

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE ENSAIO-NÃO-DESTRUTIVO  
UTILIZANDO HOLOGRAFIA ELETRÔNICA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS  
EM CILINDROS REVESTIDOS COM BORRACHA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

**ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA**

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1994

**"DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE ENSAIO-NÃO-DESTRUTIVO  
UTILIZANDO HOLOGRAFIA ELETRÔNICA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS  
EM CILINDROS REVESTIDOS COM BORRACHA"**

**ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

*Armando Albertazzi*

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Orientador

*Antonio Fábio Carvalho da Silva*

Prof. Antonio Fábio Carvalho da Silva  
Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**

*Armando Albertazzi*

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

*Arno Blass*

Prof. Arno Blass, PhD.

*Herman A. H. Lücke*

Prof. Herman A. H. Lücke, Dr. Ing.

*José Ricardo Rebello*

Eng. José Ricardo Rebello, M.Sc.

Aos meus Pais

Ao meu País

A Luciane, minha namorada

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, por ter me dado saúde e disposição para que eu pudesse realizar este trabalho;
- Ao povo brasileiro, pelo sacrificado apoio financeiro fornecido por intermédio da CAPES;
- Aos meus tios Antonio Sebastião e Natália, pelo grande apoio recebido;
- À Fundação CERTI / LABMETRO pela disposição de sua infraestrutura;
- Ao Professor Armando Albertazzi, pelo empenho para viabilizar este trabalho e pela dedicação na orientação ao longo de toda sua realização;
- À Indústria Borrachas NSO, pelas informações técnicas e materiais de ensaio fornecidos;
- Aos laboratórios da UFSC, pelo apoio no empréstimo de equipamentos:
  - . LABSHIP - Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (Eng. Mecânica)
  - . LABMAT - Laboratório de Materiais (Eng. Mecânica)
  - . LAMEP - Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência (Eng. Elétrica)
  - . Laboratório de Materiais (Física), nas pessoas dos professores Rogério e Joel.
- Ao acadêmico Eduardo Martins de Brito Jr., pela ajuda no desenvolvimento do trabalho;
- Aos professores Alfredo Tibúrcio Nunes Pires (Laboratório de Polímeros - UFSC), Eloísa Biasotto Mano (Instituto de Macromoléculas - IMA - UFRJ) e Arno Blass (Laboratório de Materiais - EMC - UFSC), pelas valiosas informações e bibliografias fornecidas;
- Aos técnicos da Fundação CERTI: Danilo José dos Santos e Detlef, pela grande ajuda prestada durante a fase experimental;
- A todos os professores, colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.



# ÍNDICE

<b>RESUMO .....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS E TABELAS .....</b>	<b>x</b>
 <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	 <b>01</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO/OBJETIVOS DO TRABALHO .....	03
1.2 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO .....	04
 <b>2. ENSAIOS-NÃO-DESTRUTIVOS (NDT) .....</b>	 <b>07</b>
2.1 - CONTEXTO ATUAL.....	09
2.2 - CONFLITO TÉCNICO-ECONÔMICO DOS NDT .....	12
2.3 - TÉCNICAS DE NDT .....	13
2.3.1 - Técnicas Optomecânicas .....	14
2.3.2 - Técnicas com Radiação Penetrante .....	18
2.3.3 - Técnicas Eletromagnéticas .....	19
2.3.4 - Técnicas Sônicas-Ultrassônicas .....	21
2.3.5 - Técnicas Térmicas .....	24
2.4 - QUADRO COMPARATIVO .....	26
 <b>3. HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E SUA APLICAÇÃO EM NDT .....</b>	 <b>30</b>
3.1 - O EFEITO SPECKLE .....	31
3.1.1 - Formação do Padrão de speckle .....	31
3.1.2 - Alteração do Padrão de speckle .....	36
3.2 - HOLOGRAFIA ELETRÔNICA (HE) .....	38
3.2.1 - Princípio Operacional .....	38
3.2.2 - Mapas de Fase .....	42
3.2.3 - Configurações utilizadas .....	45
3.2.4 - A Estação Holográfica .....	48

<b>3.3 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS (PI)</b>	49
3.3.1 - Fundamentos	49
3.3.2 - Operações de PI	50
3.3.3 - Derivada de Imagens	54
<b>3.4 - UTILIZAÇÃO DA HE + PI PARA ENSAIOS-NÃO-DESTRUTIVOS</b>	58
3.4.1 - Princípio de Funcionamento	58
3.4.2 - Requisitos Operacionais	59
3.4.3 - Estudo de casos: Carregamento x Defeito x Material	60
<b>3.5 - PROPOSTA DE METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE UM NDT COM HOLOGRAFIA ELETRÔNICA</b>	73
 <b>4. CILINDROS METÁLICOS REVESTIDOS COM BORRACHA</b>	 81
<b>4.1 - BORRACHA</b>	82
4.1.1 - Estrutura Molecular	83
4.1.2 - Processos de Fabricação da Borracha	86
4.1.3 - Propriedades Físicas	87
4.1.3.1 - Propriedades Mecânicas	87
4.1.3.2 - Propriedades Térmicas	92
<b>4.2 - REVESTIMENTO DE CILINDROS</b>	94
4.2.1 - Processo de Fabricação	95
4.2.2 - Problemas no Processo	97
4.2.2.1 - Falhas de adesão	97
4.2.2.2 - Falta de homogeneidade na borracha	99
4.2.3 - Técnicas de Inspeção	100
<b>4.3 - UTILIZAÇÃO DOS CILINDROS</b>	101
4.3.1 - Dinâmica do processo	101
4.3.2 - Condições de Utilização	102
 <b>5. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ALTERNATIVAS EXPERIMENTAIS</b>	 103
<b>5.1 - IDEALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS</b>	103
5.1.1 - Alternativas a analisar	104
5.1.2 - Critérios de Avaliação	105
5.1.3 - Avaliação	106

<b>5.2 - ALTERNATIVAS MAIS PROMISSORAS .....</b>	<b>108</b>
5.2.1 - Peso Próprio .....	108
5.2.2 - Carregamento Térmico .....	109
5.2.3 - Cisalhamento .....	110
5.2.4 - Força Centrífuga .....	112
5.2.5 - Vácuo .....	113
 <b>6. TESTES DE VIABILIDADE .....</b>	 <b>114</b>
6.1 - ESPECIFICAÇÃO E FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	114
6.2 - ENSAIOS COM CARREGAMENTO PELO PESO PRÓPRIO .....	117
6.3 - CARREGAMENTO TÉRMICO .....	121
6.4 - CISALHAMENTO DA BORRACHA .....	127
6.5 - FORÇA CENTRÍFUGA .....	131
6.6 - APLICAÇÃO DE VÁCUO .....	136
 <b>7. APROFUNDAMENTO E PADRONIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES     EXPERIMENTAIS.....</b>	 <b>143</b>
7.1 - ASPECTOS DE QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS .....	143
7.2 - APROFUNDAMENTO EXPERIMENTAL .....	145
7.2.1 - Compensação de deslocamento de corpo rígido .....	145
7.2.1.1 - Compensação manual .....	146
7.2.1.2 - Compensação eletrônica .....	147
7.2.2 - Testes de Aprofundamento .....	148
7.2.2.1 - Descolamento de 40 mm .....	149
7.2.2.2 - Descolamento de 20 mm .....	150
7.2.2.3 - Descolamento de 10 mm .....	151
7.3 - PADRONIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TESTES .....	154
 <b>8. CONCLUSÕES .....</b>	 <b>156</b>
8.1 - DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	157
8.2 - VALIDADE DO TRABALHO.....	160
8.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	163
 <b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>164</b>

## RESUMO

Neste trabalho demonstram-se os conceitos e potencialidades da Holografia Eletrônica como uma ferramenta efetiva de análise experimental em Ensaios-Não-Destrutivos para detecção de defeitos.

Apresenta-se uma abordagem genérica sobre os Ensaios-Não-destrutivos, discutindo sua importância e tendências atuais, e reunindo informações acerca das potencialidades e limitações das principais técnicas utilizadas em ensaios de materiais e peças. Dentre estas técnicas, verificou-se que nenhuma traz uma solução satisfatória para o problema analisado: descolamentos na interface metal-borracha de cilindros revestidos, utilizados em laminação.

Aplicando a Holografia Eletrônica e analisando-se em profundidade este problema, de interesse de um setor Industrial, foram desenvolvidos dispositivos e métodos de ensaio que possibilitaram a identificação destes defeitos internos e de outras imperfeições construtivas presentes nos cilindros revestidos.

Procurando tornar estas imperfeições mais perceptíveis, foram testados e implementados métodos de processamento de imagens, por meio dos quais conseguiu-se uma interpretação qualitativa mais fácil e direta dos resultados da Holografia Eletrônica.

## ABSTRACT

This work presents a study of the concepts, advantages and limitations of TV Holography (ESPI) for Nondestructive Testing (NDT) of materials.

It is presented a general study of NDT techniques, its importance, new tendencies and discussions about the applicability of some techniques for detection of defects in materials. About these NDT techniques group, it was concluded that none of them would be efficient for application in one class of problems: disbonds in the rubber to metal interface of covered cylinders.

Specific devices and experimental techniques were developed in order to make it possible to detect the disbonds and other manufacturing imperfections in the covered cylinders by using TV Holography.

To better visualization of the defects, it was implemented and tested specific image processing techniques, that made the analysis of the experimental results easier.

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

- Capítulo 2:

Tabela 2.1 - Quadro comparativo de NDT .....28

- Capítulo 3:

Figura 3.1 - Superposição de ondas luminosas .....32

Figura 3.2 - Reflexão difusa oferecida por superfície rugosa .....34

Figura 3.3 - Padrão de speckle .....35

Figura 3.4 - Variação de fase do speckle .....36

Figura 3.5 - Superposição de padrões de speckle sobre o CCD .....38

Figura 3.6 - Mapa de franjas .....40

Figura 3.7 - Mapa de fase .....44

Figura 3.8 - Configurações de iluminação simples .....45

Figura 3.9 - Sensibilidade: Iluminação simples .....46

Figura 3.10 - Configuração de iluminação dupla .....46

Figura 3.11 - Sensibilidade: iluminação dupla .....47

Figura 3.12 - Visão geral da Estação Holográfica .....48

Figura 3.13 - Imagem Digitalizada .....50

Figura 3.14 - Operações algébricas .....51

Figura 3.15 - Translação em imagem digitalizada .....53

Figura 3.16 - Filtragem utilizando FFT bidimensional .....53

Figura 3.17 - Gradiente .....55

Figura 3.18 - Fluxograma do Gradiente sobre Imagem .....56

Figura 3.19 - Gradiente e equalização de histograma sobre um mapa de fase .....57

Figura 3.20 - Flexão em bronzina .....63

Figura 3.21 - Efeito do cisalhamento sobre região descolada .....64

Figura 3.22 - Fluxograma do processo de desenvolvimento de NDT com HE .....79

## - Capítulo 4:

Figura 4.1 - Cadeia polimetilênica .....	83
Figura 4.2 - Rotação do grupo CH <sub>3</sub> em torno das ligações C-C .....	84
Figura 4.3 - Distorção das cadeias .....	85
Figura 4.4 - Representação do comportamento mecânico de um polímero .....	89
Figura 4.5 - Comportamento de um polímero em fluência, representado através de modelos de Maxwell e Voigt .....	90
Figura 4.6 - Relação da linearidade da curva tensão-deformação com nível de aditivação nas borrachas.....	91
Tabela 4.1 - Coeficiente de dilatação térmica de materiais .....	93
Figura 4.7 - Aplicação da borracha sobre cilindro .....	96
Figura 4.8 - Falha de adesão no revestimento, causando o rompimento da borracha .....	98

## - Capítulo 5:

Figura 5.1 - Carregamentos e sensibilidades a analisar .....	104
Figura 5.2 - Quadro avaliativo de alternativas experimentais .....	107
Figura 5.3 - Fluência pelo peso próprio da borracha .....	109
Figura 5.4 - Efeito do aquecimento sobre falhas de adesão .....	110
Figura 5.5 - Efeito do cisalhamento sobre descolamentos em revestimentos de borracha .....	111
Figura 5.6 - Comportamento de cilindro sob rotação .....	112
Figura 5.7 - Efeito da aplicação de vácuo sobre falhas de adesão nos cilindros .....	113

## - Capítulo 6:

Figura 6.1 - Corpo de prova padronizado .....	116
Figura 6.2 - Dispositivos utilizados .....	117
Figura 6.3 - Fluência pelo peso próprio em borracha de dureza 90 .....	118
Figura 6.4 - Fluência sobre borracha de dureza 40 e espessura 8 mm .....	119
Figura 6.5 - Fluência sobre borracha de dureza 60 e espessura 6 mm .....	119

Figura 6.6 - Deformação por efeito de esforço concentrado .....	120
Figura 6.7 - Aquecimento por resistência elétrica .....	122
Figura 6.8 - Efeito do calor sobre peça sem defeitos .....	123
Figura 6.9 - Efeito do calor sobre peça com defeito de 40 mm .....	123
Figura 6.10 - Resultados da aplicação do gradiente .....	125
Figura 6.11 - Gradiente sobre lados opostos de uma mesma peça .....	126
Figura 6.12 - Dispositivo para aplicação de compressão e cisalhamento .....	127
Figura 6.13 - Resultado da compressão .....	128
Figura 6.14 - Resultados do cisalhamento sobre a peça com defeito de 40 mm .....	130
Figura 6.15 - Aparato para aplicação da rotação .....	132
Figura 6.16 - Resultados da aplicação da força centrífuga .....	133
Figura 6.17 - Rotação de 6800 rpm: descolamento de 20 mm .....	134
Figura 6.18 - Rotação de 6800 rpm sobre peça com descolamento de 40 mm .....	135
Figura 6.19 - Procedimento inicialmente utilizado para aplicação de vácuo .....	137
Figura 6.20 - Vácuo sobre descolamento de 40 mm .....	138
Figura 6.21 - Efeito do impacto de ar sobre a borracha .....	138
Figura 6.22 - Câmara de vácuo .....	139
Figura 6.23 - Deformação da placa com vácuo .....	140
Figura 6.24 - Fluência pela retirada do vácuo .....	142

## - Capítulo 7:

Figura 7.1 - Compensação manual do deslocamento de corpo rígido .....	146
Figura 7.2 - Fixação do cilindro após rotação .....	147
Figura 7.3 - Compensação eletrônica do deslocamento de corpo rígido .....	148
Figura 7.4 - Rotação de 4500 rpm sobre falha de 40 mm .....	149
Figura 7.5 - Rotação de 6000 rpm sobre falha de 40 mm .....	150
Figura 7.6 - Rotação de 8000 rpm sobre falha de 20 mm .....	151
Figura 7.7 - Rotação de 8600 rpm sobre falha de 10 mm .....	152
Figura 7.8 - Efeito do calor gerado durante a rotação .....	153
Figura 7.9 - Tabela com condições padronizadas de ensaio .....	155
Figura 7.10 - Posicionamento dos elementos sobre bancada de testes .....	155



## 1. INTRODUÇÃO

As técnicas interferométricas têm sido usadas há diversos anos em vários campos da mecânica experimental, incluindo a análise experimental de tensões e a inspeção de materiais. A elevada sensibilidade normalmente proporcionada por estas técnicas e a possibilidade de visualização e medição dos deslocamentos sobre toda a superfície visível de um corpo são fatores que motivaram a prática e desenvolvimento de tais técnicas.

No entanto, para estes propósitos, estas técnicas, não raro, se mantiveram em ambientes controlados de laboratório. Este confinamento tem se devido principalmente a problemas de estabilidade nos sistemas, ao lento e incômodo manuseio dos dispositivos necessários para sua implementação e, talvez em função destas limitações, também a uma falta de maior direcionamento no desenvolvimento destas técnicas em relação à sua aplicabilidade no meio produtivo [1].

O desenvolvimento dos modernos sistemas digitais de processamento de imagens propiciou o aperfeiçoamento das técnicas interferométricas. Os processos foram automatizados tornando-se mais robustos, rápidos e baratos, ficando mais acessíveis ao uso comum e aumentando seu campo de aplicação. Nesse novo contexto, muito se tem feito para aproximar estas técnicas do meio industrial.

A Holografia Eletrônica (HE) ou Interferometria Eletrônica de Padrões de Speckle (ESPI) foi uma destas técnicas, surgidas a partir de tais sistemas. A velocidade com que a aquisição e o processamento da imagem ocorrem, a maior confiabilidade e precisão no processo aliadas aos inúmeros recursos possibilitados pela eletrônica, fazem da HE uma técnica bastante atrativa para análise experimental de materiais e peças.

A utilização da HE como ferramenta de análise experimental tem ocorrido em duas linhas básicas:

- a) medição de deslocamentos na superfície de um corpo sob ação de um carregamento físico que, por processos numéricos, possibilita a obtenção da tensão e deformação;
- b) qualificação de materiais e peças, a partir do campo de deslocamentos (observado e/ou medido) apresentado por um corpo em função de um carregamento físico nele aplicado.

Em sua aplicação como ferramenta de inspeção na qualificação de materiais e peças, a HE tem se mostrado como uma poderosa técnica no estratégico e valorizado campo dos Ensaios-Não-Destrutivos (NDT - Non-Destructive-Testing). Sua capacidade de revelar movimentos extremamente pequenos e anormalidades na superfície de um corpo em tempo real são características de destaque e a sua utilização tem levado a resultados promissores, já existindo casos consagrados de sua utilização no meio industrial [2 - 4].

O desenvolvimento de técnicas de NDT com HE demanda uma série de procedimentos e equipamentos dedicados ao caso a inspecionar e está, fundamentalmente, baseado em experimentação. Embora os princípios de medição/observação com HE sejam sempre os mesmos, os requisitos operacionais para a inspeção fazem com que as técnicas sejam particularizadas para cada caso. A exploração de tecnologias nesta área requer, pois, tanto o domínio da HE como sistema de medição, quanto dos procedimentos necessários para sua utilização como ferramenta de NDT, e a isto se tem dispensado bastante pesquisa e investimentos.

## 1.1 - MOTIVAÇÃO/OBJETIVOS DO TRABALHO

A realização deste trabalho foi motivada pela necessidade de explorar o potencial da HE para NDT e estabelecer uma sistemática de procedimentos para o desenvolvimento de técnicas de inspeção utilizando esta ferramenta. Ao se demonstrar os princípios, potencialidades e limitações da técnica através da aplicação de seus conceitos em um caso real da indústria, objetiva-se contribuir para sua aproximação com o meio produtivo, divulgando-a e orientando o seu uso.

Foi identificado junto ao setor produtivo uma classe de problemas sobre a qual a HE poderia ser utilizada para a localização de defeitos. A Empresa NSO, fabricante de cilindros metálicos revestidos de borracha utilizados em laminação de papel e têxteis, apresentou um problema que, em geral, afeta a fabricação destas peças: o processo de revestimento dos cilindros requer que na interface metal-borracha exista uma perfeita adesão entre estes dois materiais. Descolamentos entre camadas, vazios ou impurezas presentes nesta região poderão afetar a vida útil do componente, prejudicando sua qualidade, os usuários e, principalmente, a reputação do fabricante.

Muito já se trabalhou na causa deste problema e a sua ocorrência se reduziu bastante, mas ainda não se pode garantir que o produto não falhará dentro de sua vida útil esperada em decorrência de falhas de adesão. Em função disto, normalmente os fabricantes, impossibilitados de inspecionar de forma não destrutiva, fornecem garantia total sobre seus produtos, repondo o componente em caso de falha em operação. Isto acarreta um custo financeiro bastante alto para a empresa com reflexo nos preços praticados e não garante a reputação do fabricante, pois o usuário pode provocar descolamentos em peças perfeitamente fabricadas, ao utilizá-las acima de suas especificações de carga.

De posse de uma ferramenta que lhe possibilite detectar não-destrutivamente o problema, o fabricante poderá impedir que peças imperfeitas cheguem até os usuários, deixando de embutir os custos de uma eventual reposição. Com isto, haverá uma redução nos seus custos, preservando sua reputação e aumentando sua competitividade no mercado. A sua utilização tornará possível a certificação de seus produtos como perfeitos, evitando cobrir indevidamente os gastos por problemas causados por má utilização de um produto perfeitamente fabricado.

Além de atuar puramente no controle de qualidade final, uma ferramenta como esta poderá ser utilizada para otimização de produtos, analisando-se algumas variantes envolvidas no processo de fabricação destas peças com vistas à melhoria na sua qualidade final.

## **1.2 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

Para atingir os objetivos acima descritos, as atividades foram planejadas e estruturadas, resultando um plano de trabalho cujas etapas correspondem aproximadamente a estrutura desta dissertação:

### **a) Capítulo 2**

Após síntese bibliográfica, relatam-se o estado-da-arte e as tendências em relação aos NDT. É feita uma descrição de algumas técnicas, seus princípios de funcionamento, aplicabilidade, vantagens e limitações. A partir destas informações, é apresentado um quadro comparando estas técnicas em algumas aplicações clássicas.

#### b) Capítulo 3

Apresentam-se os princípios da HE e seu potencial para medição, qualificação e NDT. É feita uma abordagem resumida sobre processamento de imagens, com a descrição de princípios básicos e recursos utilizados ao longo do trabalho. São estabelecidos procedimentos para o desenvolvimento de uma técnica aplicável em casos genéricos apresentados na forma de um fluxograma de processo. Após estudo de casos de aplicações bem sucedidas de HE como NDT, relatam-se os problemas e as soluções obtidas no desenvolvimento destas técnicas.

#### c) Capítulo 4

São estudados os aspectos básicos relativos ao material (borracha), sua estrutura e propriedades físicas, bem como o processo de fabricação das peças, com a análise das causas e consequências de falhas no processo. Os capítulos 2, 3 e 4 formam as etapas de embasamento teórico do trabalho.

#### d) Capítulos 5 e 6

Com base nas informações obtidas nos estudos realizados em etapas anteriores, são propostas e analisadas algumas alternativas de solução para o problema. A verificação experimental das alternativas mais promissoras, os dispositivos necessários para a execução dos testes e os resultados obtidos são descritos e analisados. Sua validade é discutida e a escolha da alternativa mais promissora é justificada. O enfoque do capítulo 5 é feito sobre a idealização e análise de alternativas enquanto o capítulo 6 trata da verificação experimental das alternativas melhor analisadas e escolha da mais promissora.

e) Capítulo 7

A alternativa escolhida é explorada em profundidade. As condições operacionais mais adequadas para uma detecção satisfatória do defeito são estabelecidas, bem como a padronização dos fatores experimentais envolvidos.

f) Capítulo 8

São apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado, identificando suas vantagens e limitações, aplicabilidade e sugestões para o aprimoramento da técnica de NDT desenvolvida.

## 2. ENSAIOS-NÃO-DESTRUTIVOS (NDT)

Os Ensaios-Não-Destrutivos (Nondestructive-Testing ou Nondestructive Evaluation - NDE) são um ramo da ciência dos materiais que está ligado a todos os aspectos de uniformidade, qualidade e funcionalidade de materiais e estruturas. Neste contexto, os NDT englobam toda a tecnologia necessária para detecção e/ou medição de propriedades significativas em itens que vão de protótipos em pesquisa a produtos acabados. Na sua identificação, termos como Avaliação Não-Destrutiva (Nondestructive Evaluation - NDE) e Avaliação de Materiais (Materials Evaluation - ME) são também utilizados.

Por definição, os NDT consistem de todas as técnicas de inspeção capazes de detectar falhas e não-conformidades em materiais e estruturas sem prejudicar a utilidade ou a funcionalidade da unidade [5] e, com esta propriedade, têm se prestado a um amplo e crescente número de aplicações.

No âmbito industrial, é prática usual a realização de testes de resistência para inspeção de produtos, submetendo-se o corpo a uma condição de utilização superior àquela para a qual foi projetado, de modo a testar sua adequação a esta função. Estes testes, além de serem de realização muito cara em 100% dos produtos, não se aplicam a certas estruturas e, mais ainda, não são suficientes para assegurar que o produto não falhará dentro da vida útil esperada. Peças podem suportar esforços acima de seus limites operacionais em testes estáticos, mas falhar sob condições abaixo deste limite, devido a imperfeições construtivas que venham a causar uma falha após certo número de ciclos, ou ainda por falhas causadas pela ação de agentes agressivos do meio.

Testes destrutivos de fadiga são realizados em alguns produtos de modo a avaliar o tempo de vida destes, sob condições normais de carregamento. Outras estruturas, por serem críticas em termos de segurança, são sistematicamente afastadas do serviço após uma certa fração de seus tempos de vida como forma de evitar acidentes. Estes procedimentos acarretam normalmente um custo muito alto.

Os procedimentos de testes destrutivos, necessários para se obter previsões estatísticas consistentes do seu tempo de vida, são extremamente caros e, por definição, não podem ser aplicados onde se requeira uma avaliação de 100% das peças fabricadas/montadas. Ensaio-Não-Destrutivo são então implementados em alguns casos, tanto no processo de produção como durante operação para coleta de informações sobre integridade e adequação do produto, visando detectar falhas ocultas e deteriorações que possam causar danos ao componente.

Com a utilização crescente de estruturas complexas e com o uso de novos materiais, os processos de fabricação tornam-se cada vez mais elaborados tecnologicamente e mais caros. Ao lado disto, a crescente competitividade industrial, a busca por maior qualidade nos produtos e a redução de custos têm impulsionado as atividades de NDT, exigindo-lhes ferramentas cada vez mais aprimoradas e confiáveis, a um custo viável de implantação [6].

O domínio de tecnologias neste campo e a existência de pessoal qualificado são, pois, de importância estratégica para apoiar o desenvolvimento técnico-científico das áreas correlacionadas.



## 2.1 - CONTEXTO ATUAL

Os NDT tiveram grande impulso durante e após a II Guerra Mundial, com os avanços tecnológicos ocorridos, mas já eram praticados, embora em pequena escala, desde a década de 20, quando os primeiros testes radiográficos em metais foram realizados. Historicamente muitas técnicas foram surgindo, sendo desenvolvidas e utilizadas em aplicações as mais diversas, constituindo hoje um campo muito amplo e valorizado, principalmente pela alta especialização exigida dos profissionais e pela grande importância e responsabilidade normalmente envolvidas nestas operações.

O campo de aplicações dos NDT é hoje tão amplo, que seu pleno domínio constitui uma especialização altamente sofisticada na área de controle de qualidade de processos industriais. A imposição das normas internacionais resultou numa necessidade veemente de comprovação e certificação da qualidade dos processos e produtos, requerendo a preparação de profissionais compatíveis com as diferentes áreas de atuação. Normalmente, a execução de NDT requer cuidados especiais devido à alta tecnologia empregada bem como à necessidade de mão-de-obra qualificada e equipamentos sofisticados [7].

Nos anos 80 e 90 com a vertiginosa busca pela garantia da qualidade em produtos e serviços, os NDT passaram a receber uma atenção especial, compatível com sua importância. Neste período, contabilizam-se o surgimento de novas sociedades nacionais de apoio e fiscalização às atividades de NDT [8] e uma maior presença e atuação das sociedades já existentes, junto a usuários ou prestadores de serviço nesta área, no sentido de orientar potenciais usuários sobre os fatores que cercam e prescrevem uma utilização adequada de cada técnica. São exemplos a *American Society for Nondestructive Testing*, *British National NDT Society* e *Associação Brasileira de Ensaio-Não-Destrutivos (ABENDE)*. Para atingirem estes objetivos, tais

sociedades têm crescentemente buscado apoio e participação de sua comunidade de NDT e o intercâmbio constante com sociedades de outros setores (Materiais, soldagem, etc.) em seus respectivos campos de interesse [9].

A utilização de NDT em setores da atividade industrial tem se justificado normalmente por duas razões principais:

#### 1) Segurança:

A engenharia moderna tem gerado produtos (plantas petroquímicas, grandes aeronaves, trens de alta velocidade, usinas nucleares, etc.) nos quais uma falha pode levar a perdas de vida humana numa escala inaceitável. Tais falhas têm que ser evitadas. Os NDT têm uma importância vital na prevenção destas falhas, e seus iminentes desastres, por permitir um acompanhamento de como o produto se comporta no decorrer de sua vida operacional.

#### 2) Melhoria na qualidade

Em um mercado cada vez mais competitivo e dinâmico, onde se busca crescentemente elevar os níveis de qualidade e confiabilidade dos produtos, os NDT se constituem cada vez mais em uma ferramenta presente e importante nos meios de produção.

Através da aplicação de ferramentas adequadas de NDT se busca um recurso que auxilie em diversas etapas do processo produtivo, a saber:

- Auxílio no projeto e desenvolvimento de produtos;
- Controle de processos de fabricação;
- Redução nos custos de fabricação;
- Manutenção de um nível de qualidade uniforme e seguro.

Com isto, se tem conseguido melhoria tecnológica nos produtos e processos, redução nos custos de produção e nos custos ao longo do ciclo de vida do produto, com os conseqüentes benefícios em termos de confiabilidade do produto (e da Empresa) no mercado e redução dos seus custos operacionais. Estes fatores de custo são altamente dependentes da qualidade inicial (projeto + fabricação) e inspeção de componentes e montagens críticas [5].

Os NDT estão se tornando mais importantes à medida que as inovações tecnológicas ocorrem de maneira cada vez mais rápida [10]. A qualidade de novos materiais (novas ligas, compostos, cerâmicas), novos produtos e novos procedimentos de projeto freqüentemente têm dependido dos NDT. No caso dos novos materiais, apesar da escolha do material poder ser feita com base no conhecimento de suas propriedades estáticas e mesmo com base no conhecimento de como o material se comporta a curto ou médio prazo, é necessário ainda saber como estes materiais irão se comportar mediante falhas de fabricação ou ainda como o material poderá se degradar em operações de longa duração. Adiciona-se ainda o fato de que os novos produtos não apresentam histórico em relação a produtos mais antigos e conhecidos. Em ambas circunstâncias, os NDT durante fabricação e monitoramento em serviço são de grande valia.

Modernos procedimentos de projeto também podem requerer uma maior necessidade de NDT. Um componente projetado com base em um critério de vida relacionado com uma deterioração progressiva (corrosão, crescimento de trincas, danos por fluência) requer NDT periodicamente por um método que, idealmente, possa determinar estágios gradativos de deterioração. A crescente tendência de automatização de processos e busca de maior produtividade também tem levado ao aperfeiçoamento dos NDT e sua adequação às modernas técnicas de produção [11, 12].

## 2.2 - CONFLITO TÉCNICO-ECONÔMICO DOS NDT

Os NDT envolvem normalmente investimentos iniciais elevados com a compra de equipamentos, contratação ou treinamento de pessoal, adaptações físicas em setores, etc., e, em certos casos, operações de risco. Espera-se, pois, que, quando operacionalizados, por fatores econômicos ou de segurança, apresentem resultados confiáveis e úteis para os fins pretendidos.

No entanto, não são poucos os casos em que a implementação de sistemas de NDT ficaram a desejar em termos de eficácia e confiabilidade, ou não deram o retorno financeiro desejado. Erros de avaliação técnica e econômica durante o seu desenvolvimento e utilização são as principais causas.

As técnicas de NDT, ao contrário dos ensaios destrutivos, são bastante específicas. Normalmente revelam somente tipos de defeitos específicos para os quais foram projetadas, devendo ser selecionadas de acordo com condições específicas. A seleção e aplicação de um NDT no âmbito industrial requer um gerenciamento bastante eficiente. A segurança com que decisões técnicas são tomadas tem um efeito vital na reputação e lucratividade da Empresa. Este aspecto requer um completo conhecimento da natureza dos materiais envolvidos, das condições de produção e serviço às quais são submetidos e um entendimento do contexto geral dos NDT, suas vantagens, limitações e uso adequado das técnicas [13 , 14].

Os custos da utilização de um NDT dependem, principalmente, do que é inspecionado e em que quantidade, qual o propósito da inspeção e por qual método será realizada. A viabilidade da utilização de uma técnica de NDT demanda atenção aos aspectos técnicos e econômicos, interligados entre si.

### 2.3 - TÉCNICAS DE NDT

Os NDT se compõem hoje de um grande número de técnicas, utilizando princípios físicos os mais variados, e destinados a diversas aplicações, cada uma possuindo suas vantagens e limitações de ordem técnica e econômica, algumas muito recentes e outras bem conhecidas, porém todas elas passando por estágios constantes de desenvolvimento tecnológico.

É incorreto afirmar de maneira genérica a existência de uma técnica melhor ou mais poderosa que as demais sem se considerar a aplicação pretendida. Do mesmo modo, não existe uma técnica de NDT universal, aplicável a qualquer tipo de material, estrutura ou função requerida. Cada caso possui características próprias que demandam uma série de requisitos particulares a serem atendidos pela técnica de NDT.

Apesar da grande diversidade, os NDT possuem características semelhantes entre si, o que torna possível classificá-las em grupos menores. Cada técnica de NDT pode ser caracterizada em termos de cinco fatores principais [15]:

- Fonte de energia ou meio utilizado para inspecionar o objeto, como Raio-x, ondas ultrassônicas, etc.;
- Natureza do sinal ou imagem resultante da interação com o objeto (atenuação de Raios-x, reflexão de ultrassom, etc.);
- Método de detecção destes sinais resultantes (Emulsão fotossensível, cristal piezoelétrico, etc.)
- Método de indicação ou registro do sinal (osciloscópio, fotografia, etc.)
- Possibilidade de análise dos resultados (indicação direta ou indireta, quantitativo ou qualitativo)

Normalmente se classificam as técnicas de acordo com o primeiro destes fatores, dividindo-as em grupos em função do tipo de energia empregada para caracterizar as propriedades do elemento em análise. A seguir são apresentadas algumas técnicas de NDT que, dentre a bibliografia consultada, verificou-se serem mais conhecidas/utilizadas para ensaios de materiais. Para sua classificação, adotou-se um procedimento semelhante ao do *National Materials Advisory Board (NMAB) Ad Hoc Committee on Nondestructive Evaluation (NDE)* [15]. Mais detalhes operacionais a cerca de tais NDT podem ser encontrados também nas referências [5 , 16 - 19].

### **2.3.1 - Técnicas Opto-mecânicas**

Nas técnicas classificadas neste grupo, a inspeção feita de forma visual, diretamente ou auxiliada por instrumentos é aplicada à superfície do objeto para indicações de falhas e anomalias, podendo serem realizadas independentemente ou com auxílio de outras técnicas de NDT. Incluem-se também as técnicas operacionalizadas por meio da verificação de propriedades mecânicas, como deformação de materiais e variação de pressão. Foram incluídas:

#### **2.3.1.2 - Ensaio Visual**

O mais antigo e simples de todos os NDT. A partir da simples observação do estado superficial de um objeto, a olho nu ou com auxílio de instrumentos ópticos, levantam-se informações para caracterizá-lo. Pode ser aplicado a qualquer material, mas possui as limitações da necessidade de acesso visual e de não localizar falhas internas. A sensibilidade é determinada de acordo com o recurso óptico utilizado. Normalmente requer uma suplementação com outra técnica de NDT para detecção, discriminação e quantificação da falha.

### **2.3.1.2 - Interferometria a LASER**

As diversas técnicas interferométricas normalmente possibilitam observação e medição do campo de deslocamentos experimentado pela superfície de um corpo em função de um carregamento nele aplicado. Deste modo, a diferenciação entre peças boas e defeituosas é feita em função do tipo de resposta apresentado por estas a uma determinada solicitação física. As técnicas mais antigas normalmente fazem esta visualização com auxílio de sistemas fotográficos, havendo uma recente adaptação destas para uso com sistemas de vídeo.

Possuem normalmente alta sensibilidade a deslocamentos superficiais e podem ser aplicadas sempre que se conseguir fazer com que o defeito cause uma distorção superficial e também para análise de tensões em materiais. Possuem como principais limitações, a necessidade de aplicação de um carregamento físico, o fato de serem bastante sensíveis a vibrações do meio e ao lento processamento necessário para algumas destas técnicas de NDT. Estas duas últimas limitações foram minimizadas e superadas, respectivamente, com a utilização de sistemas eletrônicos de processamento de imagens.

### **2.3.1.3 - Revestimento Fotoelástico**

É operacionalizada pelo fato de um revestimento plástico transparente, aplicado sobre uma peça a inspecionar, tornar-se birrefringente quando tensionado, revelando a resposta oferecida pelo corpo ao carregamento na forma de franjas, relacionadas às tensões presentes. A visualização e análise destas franjas fornecerá informações acerca da integridade deste corpo.

Sua principal vantagem está na visualização do campo de tensões em toda a superfície a inspecionar, mas possui baixa sensibilidade e a superfície deve ser lisa e apresentar boa reflexão à luz. Outros fatores limitantes são a necessidade de acesso para visualização e colocação do revestimento e o fato deste permanecer na peça após os ensaios.

#### **2.3.1.4 - Líquido Penetrante**

É um dos mais antigos e utilizados métodos de NDT. Baseia-se no efeito de capilaridade apresentado pelos líquidos, ou seja, na capacidade que têm de penetrar em pequenas cavidades, movidos pelas forças de tensão superficial. A superfície em teste é coberta com um líquido que, após certo tempo, penetra em irregularidades. Retirado o líquido da superfície e aplicada uma substância sobre ela (o revelador), consegue-se fazer com que o líquido restante saia do interior das falhas possibilitando sua localização.

Suas principais vantagens estão no baixo custo e facilidade operacionais. É aplicada principalmente na detecção de trincas e corrosão em estruturas metálicas. Não se aplicam a materiais porosos e absorventes; além disso, só possibilitam a detecção de defeitos externos. Requer um bom acabamento superficial, não se aplicando bem a superfícies muito rugosas.

#### **2.3.1.5 - Extensometria elétrica (Strain Gage)**

É o mais utilizado método de análise experimental de tensões. Seu princípio baseia-se no efeito da variação da resistência elétrica com a deformação mecânica de um elemento. Uma resistência elétrica é firmemente aderida à superfície a medir de modo a



acompanhar as deformações mecânicas sofridas por esta em função de um carregamento aplicado, causando uma variação em sua resistência elétrica. Através de equipamentos adequados consegue-se medir esta variação e correlacioná-la com a deformação mecânica.

Suas principais vantagens estão na sua boa sensibilidade, baixo custo e facilidade operacionais, além de insensibilidade a vibrações e deslocamentos de corpo rígido sofridos pelo corpo. Suas principais limitações se dão pela necessidade de acesso e preparação do local de medição e por exigir uma correta orientação dos extensômetros. Uma desvantagem desta técnica em relação às técnicas interferométricas ocorre pelos extensômetros fornecerem uma informação da tensão localizada em um ponto, enquanto aquelas fornecem informações sobre toda uma área, por isso chamadas de técnicas de campo completo. Faz-se necessário, para minimização dos erros de medição, um circuito e fios de medição bem configurados e protegidos contra ruídos eletromagnéticos e influência de variação de temperatura.

#### 2.3.1.6 - Testes de Vedação

Consiste basicamente em se forçar a entrada ou saída de um gás a uma estrutura fechada e verificar a existência de vazamentos. Instrumentos colocados interior ou exteriormente a estas estruturas são usados para localizar estas falhas ou estimar a taxa de perda.

São aplicados sempre em que se estiver verificando a estanqueidade de estruturas confinadas e/ou pressurizadas, como caldeiras, vasos de pressão, câmaras, juntas soldadas, etc. Sua principal desvantagem ocorre pelo fato de que há sempre um risco de acidentes quando se inspeciona a pressões muito altas ou alto vácuo.

### **2.3.2 - Técnicas com Radiação penetrante**

As técnicas constantes deste grupo possuem o mesmo princípio de funcionamento, embora diferenciando-se quanto ao tipo de radiação utilizada e quanto a sua aplicabilidade. O princípio baseia-se em submeter o corpo em análise a um tipo de radiação que irá penetrá-lo e, de acordo com a radiação transmitida ou atenuada por este corpo, será possível visualizar sua estrutura interna e detectar defeitos.

#### **2.3.2.1 - Raios-X**

É a mais conhecida técnica de radiação penetrante e um das mais utilizadas técnicas de NDT para ensaios de materiais. A radiação é emitida por um gerador de raios-X que penetrará o material e será mais ou menos atenuada de acordo com sua estrutura interna, sensibilizando um material fotossensível, que possibilitará a visualização desta estrutura.

Possui a grande vantagem de possibilitar a caracterização de defeitos e propriedades internas, sendo bastante utilizada na localização de trincas, porosidades, vazios e inclusões, bem como na localização de falhas estruturais e na medição de espessura em materiais. Apresenta, no entanto, riscos à saúde pela exposição excessiva à radiação, requerendo uma boa especialização e proteção do operador, além de ser necessário o acesso a lados opostos do objeto em teste. Estruturas com formas complexas dificultam a sua utilização. Requer investimentos significativos.

### **2.3.2.2 - Raios Gama**

Diferencia-se operacionalmente dos raios-X pelo tipo de radiação aplicada ao material, aqui gerada por uma fonte de isótopo. É utilizada para as mesmas aplicações com diferença de serem mais adequados para materiais densos e de paredes finas do que os raios-X.

## **2.3.3 - Técnicas Eletromagnéticas**

As técnicas eletromagnéticas possuem em comum a característica de utilizarem a variação de propriedades elétricas nos materiais, bem como efeitos de campos magnéticos nele atuantes para localização de defeitos superficiais e sub-superficiais.

### **2.3.3.1 - Técnica do Campo Magnético estático**

Um campo magnético é imposto ao objeto em teste, permeabilizando-o e magnetizando-o. Falhas superficiais ou sub-superficiais irão afetar a densidade das linhas de campo, variando a intensidade do campo magnético nestes locais. Ao se varrer a superfície com um transdutor adequado, é possível detectar esta variação e localizar as falhas.

Suas principais vantagens estão no baixo custo e em não necessitarem de pessoal muito especializado. É aplicado somente a materiais ferro-magnéticos e possui alguma dificuldade na inspeção de formas geométricas complexas, em que poderão haver variações ambíguas no campo magnético em pontos de concentração das linhas de campo. É indicada para localização de trincas, inclusões, e pontos de corrosão superficial, bem como para caracterização de propriedades magnéticas em materiais, havendo limitação na localização de falhas de maior profundidade.

### 2.3.3.2 - Partícula magnética

Constitui uma das técnicas de NDT mais utilizadas no âmbito industrial. É operacionalizada de modo bastante semelhante à técnica acima descrita, diferenciando-se pelo modo de indicação da falha. Enquanto naquela NDT a falha, denunciada pela variação campo magnético, era localizada por intermédio de um transdutor, nesta técnica aplicam-se partículas ferromagnéticas na superfície do corpo magnetizado, que irão se acumular em locais onde o campo magnético varia em função de falhas superficiais ou sub-superficiais, possibilitando sua localização.

Possibilita uma visualização mais fácil da falha do que na NDT de campo magnético estático e é aplicado para os mesmos casos, com maior ênfase para a detecção de trincas e corrosão. Também somente se aplica a materiais ferro-magnéticos, que devem apresentar uma superfície limpa e relativamente lisa.

### 2.3.3.3 - Corrente parasita (Eddy Current)

Este método se baseia nos princípios de indução magnética para investigar o material em teste. Quando uma bobina percorrida por corrente alternada é colocada em proximidade a um material, a impedância desta bobina vai variar. Esta variação está associada com o fato de que o campo da bobina induz correntes parasitas no material a inspecionar e estas correntes induzem um campo secundário que tende a se opor ao campo primário das bobinas, variando sua indutância própria e, assim, sua impedância.

A intensidade destas correntes parasitas está diretamente relacionada com o tipo e condição do material a inspecionar. A presença de descontinuidades no material causa uma variação ou redistribuição das correntes parasitas, com variação no campo secundário, na indutância própria da bobina e sua impedância. A medição desta variação com circuitos adequados possibilita a localização de defeitos.

São aplicados principalmente na localização de trincas, corrosão, inclusões e na caracterização de propriedades elétricas e magnéticas de materiais. Possui uma aplicabilidade mais ampla do que as outras técnicas eletromagnéticas citadas, em vista de não restringir-se somente a materiais ferro-magnéticos. Apresenta limitações de acesso devido à proximidade requerida entre bobina e material em teste, bem como dificuldades de inspecionar formas complexas. A pouca capacidade de penetração, limitada a paredes finas e falhas próximas à superfície, é outro fator limitante.

### **2.3.4 - Técnicas Sônicas-Ultrassônicas**

Algumas técnicas de NDT utilizam a resposta que os materiais oferecem quando submetidos a vibrações ou impactos, para caracterizar falhas e propriedades. Em função de sempre estarem envolvidas frequências vibratórias, de magnitudes sônicas ou ultrassônicas, foram classificadas neste grupo:

#### **2.3.4.1 - Ultrassom**

Bastante utilizado como técnica de NDT no âmbito industrial, o teste baseia-se no princípio de transmissão/reflexão de ondas mecânicas de alta frequência em materiais. A

inspeção torna-se possível porque a onda viaja com poucas perdas através de materiais homogêneos, exceto ao encontrar alguma descontinuidade, quando haverá uma reflexão de parte da onda e conseqüentes perdas na transmissão. A técnica ultrassônica utiliza estas propriedades para localizar falhas, podendo utilizar a parcela refletida da onda (ultrassom de reflexão) ou a parcela transmitida (ultrassom de transmissão) como sinal indicador.

É bastante utilizada para medição de espessura de parede em materiais e localização de defeitos internos, de modo geral. Tem boa aplicabilidade também na medição de posição e deslocamento e na caracterização de propriedades dinâmicas em materiais. Possui as vantagens de ser sensível a defeitos pequenos e profundos, com boa capacidade para quantificação destes defeitos.

Suas principais limitações se dão pela necessidade de operador bem especializado e equipamentos caros, além da dificuldade de inspeção de peças com pequena espessura e de forma e estrutura interna complexas, e de materiais rugosos ou de alta impedância acústica. No caso do ultrassom por transmissão, há ainda a necessidade de acesso aos dois lados do material.

#### **2.3.4.2 - Impacto Acústico**

Baseia-se na resposta dinâmica e acústica que os materiais oferecem quando submetidos a impactos e deformações. Um pulso mecânico aplicado causa vibrações e sons que podem ser indicativos de certas propriedades do material, sendo utilizados para indicação de falhas. Tais perturbações podem ser sentidas com microfones, acelerômetros ou simplesmente com o ouvido, quando exigirá do operador experiência suficiente para diferenciar peças boas e defeituosas pelo som emitido.

São mais utilizados para localização de variações dimensionais, descolamentos e delaminações e bastante aplicados para caracterização de propriedades dinâmicas de estruturas, inclusive de formas complexas. Apresentam a necessidade de contato, além de requerer um bom projeto do pulsador e correta aplicação do impacto (modo e local). Não possuem boa resolução espacial para detecção de falhas e são sensíveis a ruídos e perturbações do meio ambiente. Em materiais de alta impedância acústica, sua aplicação torna-se difícil.

#### 2.3.4.3 - Vibração Sônica

Submete-se o material em teste a vibrações contínuas, na faixa sônica (até 20 kHz), provocadas por um transdutor piezo-elétrico em contato. Ao se variar a frequência ao longo desta faixa, procura-se localizar vibrações ressonantes ou harmônicas que venham a denunciar falhas localizadas e variações em propriedades físicas dos materiais. Seu uso, com o auxílio da Holografia (Interferométrica e Eletrônica) para visualização destes locais, tem sido bastante investigado.

Aplica-se com certas restrições à localização de defeitos internos e falhas estruturais de certos metais e compostos. Possui, como a técnica de NDT de Impacto Acústico, boa capacidade de caracterizar as propriedades dinâmicas de materiais. Requer um bom contato, apoio e isolamento do objeto em teste e em geral apresenta as mesmas limitações daquela técnica.

### **2.3.5 - Técnicas térmicas:**

Procura-se identificar falhas e caracterizar propriedades nos materiais a partir da resposta que estes ofereçam a carregamentos térmicos. Possuem aplicação ainda em pequena escala como NDT no âmbito industrial. As técnicas mais significativas deste grupo diferenciam-se basicamente pelo método de medição e registro das temperaturas sobre o corpo.

#### **2.3.5.1 - Termometria por Contato**

O contato de um transdutor com a superfície aquecida possibilita identificar gradientes de temperatura que possam indicar irregularidades superficiais ou internas no material. Podem ser empregados pares termoelétricos (termopares) como transdutor, quando o sinal elétrico gerado pelos gradientes de temperatura é usado para indicação de falhas e caracterização de propriedades. Apresentam a limitação de medirem localmente a temperatura, sendo necessárias várias medidas para se inspecionar uma região. São sensíveis à temperatura e a ruídos eletromagnéticos do meio ambiente.

Em alguns casos, reveste-se o corpo com certas substâncias que tornam visíveis gradientes localizados de temperatura. Estes métodos fornecem informações puramente qualitativas.



De modo geral, aplicam-se à localização de porosidades e segregações, e para caracterização de propriedades termoelétricas dos materiais. São normalmente de baixo custo e fácil operação. Requerem, no entanto, uma superfície limpa para um bom contato. Sua aplicação se restringe a materiais que suportem nível de temperatura suficiente para tornar possível a inspeção, sem se degradarem termicamente.

#### 2.3.5.2 - Termometria por Infravermelho

Um corpo, quando aquecido, emite radiação luminosa na faixa do infravermelho, representativa do campo de temperaturas presente. Com a utilização de câmaras sensíveis consegue-se mapear termicamente o corpo, possibilitando identificar irregularidades que alterem a distribuição normal de temperatura.

Apresentam a vantagem de conseguir visualizar todo o campo térmico, embora apresentem custos bem maiores. Aplicam-se à localização de falhas internas e sub-superficiais, bem como à caracterização de propriedades térmicas nos materiais. Limitam-se também pela temperatura suportável pelo material, em relação à temperatura necessária para visualização do campo térmico.

## 2.4 - QUADRO COMPARATIVO

Como afirmado em 2.3, no campo das NDT existem diversas técnicas em utilização no âmbito industrial, cada uma possuindo características próprias que conjuntamente são aplicáveis a praticamente todos os tipos e formas de materiais e equipamentos. Ao defrontar-se com um problema de NDT, poderá haver dificuldades para um usuário em identificar quais destas técnicas serão, possivelmente, aplicáveis ao caso.

Um recurso utilizado na escolha ou identificação destas técnicas são as cartas de seleção de NDT [5], que mostram as adequações das técnicas, comparativamente entre si, frente a determinados defeitos. Estas cartas se propõem a ser guias práticos para uma primeira análise das capacidades de cada NDT, devendo ser observado que as mesmas são indicativas e não conclusivas. Elas traduzem a média da opinião de especialistas na área e são baseadas na suposição de que cada teste seja aplicado a um problema específico, sob condições técnicas adequadas.

Algumas cartas são elaboradas em maiores detalhes em relação aos tipos de aplicação, especificando cada material (metálicos, não metálicos, ...) e tipo de defeito a inspecionar (poros, inclusões, delaminações, ...). Outras cartas são mais genéricas ao analisar os defeitos e propriedades a inspecionar, agrupando e analisando-as conjuntamente. Por exemplo, poros, inclusões e delaminações seriam analisados como defeitos internos. Porém de qualquer modo, as cartas são um auxílio primário na visualização das aplicabilidades das NDT. O êxito na de uma técnica não pode, de modo algum, ser garantido apenas com a sua utilização.

Com base nas técnicas descritas anteriormente e em informações retiradas de várias cartas, nas fontes citadas na página 14, foi elaborado um quadro comparativo destas técnicas em relação a certos defeitos, de ocorrência comum em materiais e equipamentos, estando apresentado na tabela 2.1.

Devido à ênfase do trabalho se dar sobre a Holografia Eletrônica (HE) como técnica de NDT, as técnicas interferométricas foram substituídas no quadro pela HE, e as informações para caracterizá-la frente às aplicações foram obtidas do estudo de casos a ser apresentado no capítulo 3, bem como da experiência de utilização da técnica.

As aplicações a serem confrontadas com as NDT foram, do mesmo modo que as técnicas, divididas em alguns grupos visando tornar o quadro mais resumido e inteligível, sendo localizados na coluna sob o título *Geral*. Também como parte desta coluna, sob o título *Específica*, estão descritas as aplicações específicas constantes deste grupo e sobre as quais serão analisadas as NDT. As técnicas estão dispostas de modo agrupado de acordo com a classificação adotada no item 2.3.

A forma de avaliação de cada combinação NDT x Aplicação será feita através de legenda, com letras representando níveis de adequação:

**A** - Muito satisfatória

**B** - Satisfatória sob certas condições

**C** - Uso sob condições restritas

**Exp** - Uso em caráter experimental

**Vazio** - Não se aplica

TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS										
APLICAÇÃO		OPTO-MECÂNICAS							RADIAÇÃO	
GERAL	ESPECÍFICA	Visual	HE	Revestimento Fotoelástico	Líquido Penetrante	Strain Gage	Vedação	Raio-X	Raio-γ	
Defeitos Superficiais	Trincas	B	B	C	A			C	B	
	Corrosão	B	C	C	A			B	C	
	Furos/Fendas	C			B		A	B	B	
Defeitos Internos	Poros		B	C				A	B	
	Inclusões		A	C				A	B	
	Trincas		C					C	C	
	Delaminação/Descolamento	C	A	C			C	B	C	
Falhas Estruturais	Varição na Composição		C					C	C	
	Rompimento de Fibras		B		C			B	B	
	Não-Homogeneidades		C					C	C	
Propriedades Físicas	Elétricas									
	Magnéticas									
	Térmicas		Exp							
	Mecânicas		Exp			C	C			
Dimensões e Metrologia	Deslocamento/posição	C	B					Exp	Exp	
	Variações Dimensionais	C	A							
	Espessura/Densidade							B	B	
Tensões e Resposta Dinâmica	Tensão/Deformação/Fadiga		B	A		A	Exp			
	Concentração de tensões		B	A		C				
	Resposta Dinâmica		Exp	B		B		Exp		

Tabela 2.1 - Quadro comparativo de NDT

TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS									
APLICAÇÃO		ELETRO-MAGNÉTICAS			SÔNICAS-ULTRASSÔNICAS			TÉRMICAS	
GERAL	ESPECÍFICA	Campo Estático	Partícula Magnética	Eddy Current	Ultrasson	Impacto Acustico	Vibração Sônica	Contato	Infra Vermelho
Defeitos Superficiais	Trincas	A	A	A		Exp		C	C
	Corrosão	A	A	B		Exp			B
	Furos/Fendas	B	B	C		Exp			C
Defeitos Internos	Poros	C	B	C	A	C	C	C	B
	Inclusões	B	C	B	A	C	C	C	C
	Trincas			C	C	C	C		A
	Delaminação/descolamento	C	C	C	B	B	C	C	A
Falhas Estruturais	Varição na Composição	B		B				Exp	C
	Rompimento de Fibras	C		C	B		B		
	Não-Homogeneidades								
Propriedades Físicas	Elétricas			A					
	Magnéticas	A	C	A					
	Térmicas							B	C
	Mecânicas	C					Exp	Exp	
Dimensões e Metrologia	Deslocamento/posição				A				
	Variações Dimensionais					B			
	Espessura/Densidade	B		B	C	C		C	C
Tensões e Resposta Dinâmica	Tensão/Deformação/Fadiga								
	Concentração de tensões								
	Resposta Dinâmica				B	A	A		

Tabela 2.1 - Continuação

### **3. HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E SUA APLICAÇÃO EM NDT**

O desenvolvimento de uma técnica de NDT utilizando HE impõe a necessidade de um embasamento teórico sobre os princípios opto-eletrônicos e operacionais envolvidos. O conhecimento satisfatório destes aspectos favorecerá grandemente a obtenção de bons resultados, tanto por auxiliar na exploração de recursos técnicos, como por proporcionar uma maturidade que leve a um seqüenciamento adequado das atividades envolvidas na realização do trabalho.

Neste capítulo são abordados os fundamentos físicos e princípios operacionais relativos ao entendimento da HE, enquanto técnica de medição e ferramenta de NDT. Também são descritos fundamentos básicos de processamento de imagens, apresentando-se as técnicas utilizadas no trabalho para processamento e otimização das imagens resultantes ao longo dos experimentos.

Prosseguindo, é apresentada uma revisão bibliográfica contendo casos bem sucedidos da utilização da HE e outras técnicas interferométricas para NDT. Ao final é proposta uma metodologia de desenvolvimento de NDT utilizando HE, contendo procedimentos sistematizados e recomendações para futuros usuários.

### 3.1 - O EFEITO SPECKLE

Quando um corpo é iluminado por luz coerente e monocromática como o laser, a reflexão oferecida por sua superfície aparenta ter uma textura granular, com pequenos pontos claros e escuros aleatoriamente distribuídos sobre ela. Estes pontos são conhecidos como "speckle" (mancha), e ocorrem pela interferência entre os raios luminosos refletidos por diversos pontos de sua microgeometria superficial.

Pela importância básica para todo o processo de medição com HE, serão feitas algumas descrições dos princípios físicos relacionados à formação e alteração dos speckle, importantes para o prosseguimento do trabalho

#### 3.1.1 - Formação do padrão de Speckle

A luz, sendo uma onda eletromagnética, pode ser descrita pelo comportamento no tempo e espaço do seu vetor intensidade elétrica  $\vec{E}$ . Uma descrição física mais detalhada requereria uma análise de outros fatores como intensidade e indução magnética, interrelacionados nas equações de Maxwell [20]. Devido à análise a ser feita estar mais direcionada para a forma da onda luminosa do que a um aprofundamento em seus fundamentos físicos, e também pelo fato dos sistemas de registro de imagens serem mais sensíveis ao campo elétrico do que a qualquer outro, a análise será restrita a esta grandeza, da mesma forma que em [21].

Deste modo, sejam  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$  duas ondas de mesma frequência  $\omega$  e linearmente polarizadas na mesma direção, partindo dos pontos 1 e 2 e superpondo-se em 3, sobre a superfície da peça, de acordo com a figura 3.1:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega \cdot t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1) \quad (3.1)$$

e

$$E_2 = A_2 \cos(\omega \cdot t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi) \quad (3.2)$$

onde

$A_i$  = Amplitude das ondas

$\omega$  = Frequência ondulatória de  $E$

$\phi$  = Diferença de fase entre as ondas

$\vec{k}_1, \vec{k}_2$  = Vetores unitários na direção de propagação da onda 1 e 2, respectivamente

$\vec{r}_1, \vec{r}_2$  = Vetores unindo 1 e 2 à superfície em 3, respectivamente

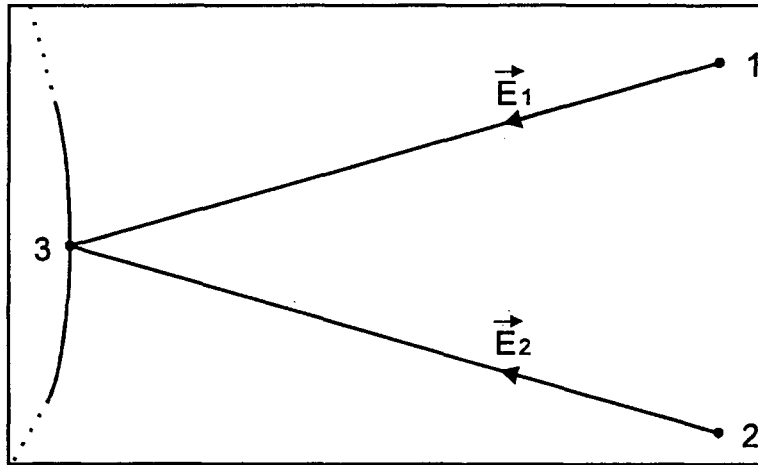


Figura 3.1 - Superposição de ondas luminosas

A superposição destas duas resultará em um campo elétrico, de intensidade

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (3.3)$$



Dada a alta frequência de oscilação da onda luminosa, aproximadamente  $10^{15}$  Hz, os sistemas de registro como o olho humano, fotodetector ou filme fotográfico não são sensíveis às variações de amplitude com o tempo. Eles respondem à **intensidade luminosa**, que é a média temporal do fluxo de energia da onda de luz, sendo diretamente proporcional ao quadrado da amplitude de variação de  $\vec{E}$ .

$$I = (\vec{E})^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot \sqrt{E_1 E_2} \quad (3.4)$$

Substituindo as eq. (3.1) e (3.2) em (3.4), tem-se:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (3.5)$$

onde

$$I_1 = A_1^2 \quad , \quad I_2 = A_2^2$$

e

$$\delta = \vec{K}_2 \cdot \vec{r}_2 - \vec{K}_1 \cdot \vec{r}_1 - \phi \quad (3.6)$$

é a diferença de fase entre as ondas em qualquer ponto. Da equação (3.5) observa-se que a intensidade varia entre um mínimo ( $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2}$ ) e um máximo ( $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 I_2}$ ), de acordo com  $\delta$ .

A eq. (3.5) é a equação básica da interferência luminosa, de importância fundamental para todos os processos interferométricos de medição e também para o processo de formação do Speckle.

Ao incidir sobre uma superfície "opticamente rugosa"<sup>1</sup>, a luz do Laser é refletida de uma forma difusa em diferentes direções (fig 3.2). A forma com que a reflexão ocorre depende da sua microgeometria superficial, que determina a intensidade, direção e fase de cada raio refletido. Por causa de sua coerência, cada raio luminoso refletido interfere com os demais e a intensidade resultante em cada ponto da superfície dependerá da amplitude e fase relativa de cada componente, ou seja, o mesmo processo de interferência descrito acima ocorrendo para  $n$  pontos (e  $n$  raios).

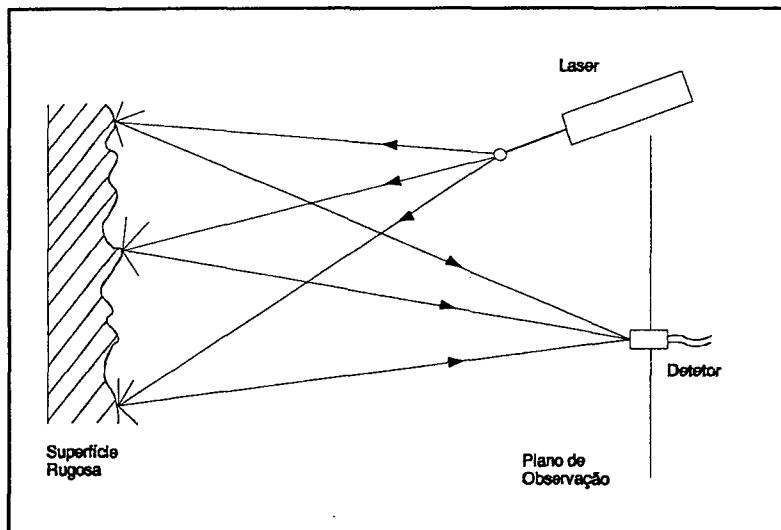


Figura 3.2 - Reflexão difusa oferecida por superfície rugosa

Se um observador é colocado em frente a esta superfície, irá registrar a ocorrência de áreas de contraste, claras e escuras, resultantes da forma com que se dá a interação entre os raios. Pontos mais claros resultarão de uma interferência construtiva ( $I = I_{\max}$ ) e pontos mais escuros serão causados por interferência destrutiva ( $I = I_{\min}$ ) entre as diversas ondas luminosas. Pontos com intensidade intermediária estarão neste meio. Este padrão granular de intensidades é denominado padrão de speckle, podendo ser visto na Fig. 3.3.

<sup>1</sup>Superfície que apresenta rugosidade superficial não inferior ao comprimento de onda do laser que a ilumina.

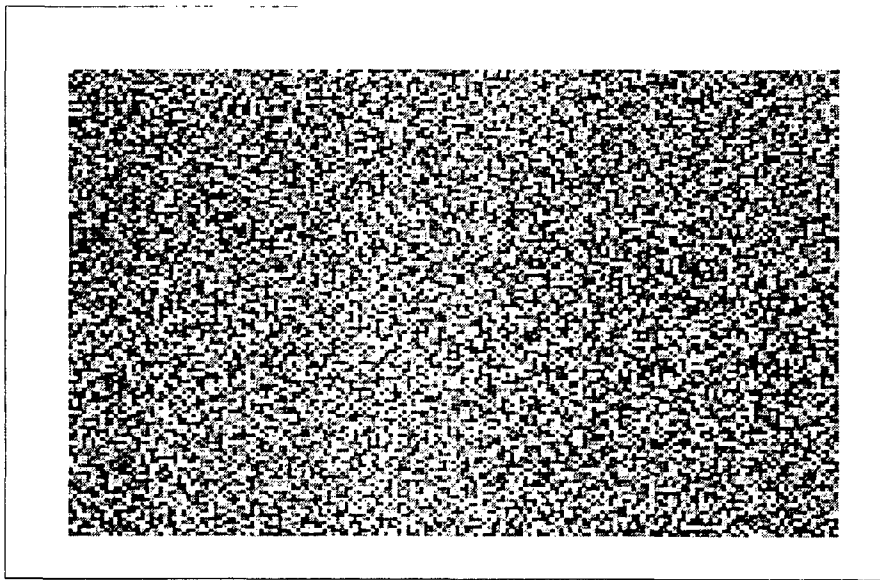


Figura 3.3 - Padrão de Speckle

Se uma imagem desta superfície iluminada é formada sobre um sistema óptico, o Speckle é denominado subjetivo. Suas dimensões serão determinadas pelo tipo de sistema óptico utilizado. São extremamente pequenos, e inversamente proporcionais à abertura óptica do sistema [22].

Por estar relacionado à rugosidade superficial do corpo iluminado pelo laser, o padrão de Speckle é essencialmente aleatório. Porém, desde que as condições de iluminação e observação e sejam mantidas, o padrão é fixo ( $\delta$  cte) e único. Mais ainda, quando superposto a uma onda luminosa, sua variação em decorrência de um deslocamento da superfície obedece a princípios físicos bem estabelecidos, baseados na variação de fase dos Speckle e na interferência entre ondas luminosas.

### 3.1.2 - Alteração do padrão de Speckle

Se o observador da figura 3.2 se mover em relação à superfície iluminada, verá que o padrão de speckle se move solidariamente, com os speckle variando rapidamente de intensidade, parecendo mover-se sobre a superfície. Esta variação de intensidade é causada pela variação da fase relativa entre os raios refletidos (eq. 3.6), constituindo-se no parâmetro utilizado na HE para caracterizar movimentos na superfície do corpo em relação a observador e iluminação fixos.

Pode-se visualizar a variação de fase dos speckle com o auxílio da fig. 3.4. O raio de luz coerente partindo da fonte **F** atinge a superfície de um corpo em **P**, refletindo para um observador situado em **O**. Deste modo, se a luz possui uma fase inicial  $\Phi_i$ , após percorrer o caminho **FPO**, atingirá o observador com fase  $\Phi_f$ , dada por:

$$\Phi_f = \Phi_i + \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{FP} \cdot \vec{K}_1 + \vec{PO} \cdot \vec{K}_2) \quad (3.7)$$

onde

$\vec{K}_i$  = vetores unitários na direção da trajetória da luz

$\lambda$  = comprimento de onda da luz

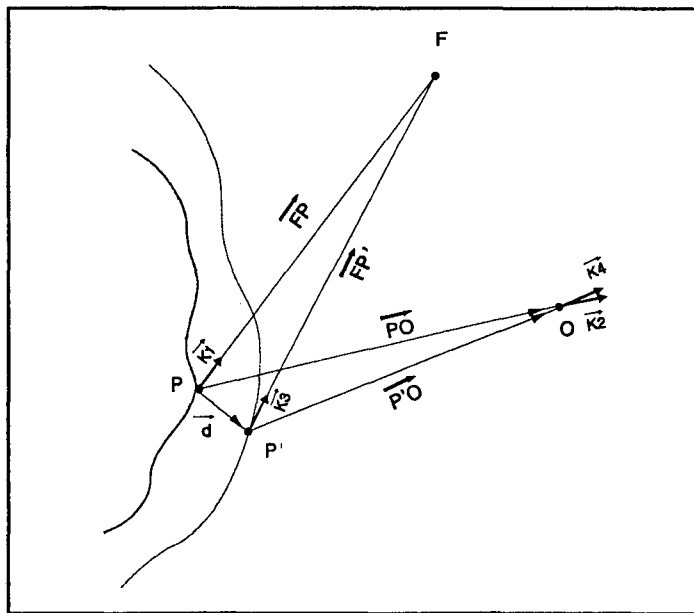


Figura 3.4 - Variação da fase do speckle

Se, agora, a superfície sofre um deslocamento  $\mathbf{d}$ , o raio irá percorrer uma nova trajetória  $\mathbf{FP}'\mathbf{O}$ , chegando ao observador com uma fase  $\phi'_f$ , dada por:

$$\phi'_f = \phi_i + \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{FP}' \cdot \vec{K}_3 + \mathbf{P}'\mathbf{O} \cdot \vec{K}_4) \quad (3.8)$$

Com isto, a fase da luz que chega ao observador  $\mathbf{O}$  terá sido alterada de

$$\Delta\phi = \phi'_f - \phi_f \quad (3.9)$$

ou seja,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{FP}' \cdot \vec{K}_3 + \mathbf{P}'\mathbf{O} \cdot \vec{K}_4 - \mathbf{FP} \cdot \vec{K}_1 - \mathbf{PO} \cdot \vec{K}_2) \quad (3.10)$$

Como as trajetórias percorridas pela luz são normalmente muito grandes comparadas aos deslocamentos, pode-se considerar  $\vec{K}_1 \approx \vec{K}_3$  e  $\vec{K}_2 \approx \vec{K}_4$  e assim a eq 3.10 fica na forma:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [ (\mathbf{FP}' - \mathbf{FP}) \cdot \vec{K}_1 + (\mathbf{P}'\mathbf{O} - \mathbf{PO}) \cdot \vec{K}_2 ] \quad (3.11)$$

Da figura 3.4 pode-se observar que

$$\mathbf{FP}' - \mathbf{FP} = \vec{d} \quad \text{e} \quad \mathbf{P}'\mathbf{O} - \mathbf{PO} = -\vec{d}$$

donde

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \vec{d} \cdot (\vec{K}_1 - \vec{K}_2) \quad (3.12)$$

Desta equação pode-se notar a existência do vetor  $(\vec{K}_1 - \vec{K}_2)$ , que é definido pelo arranjo espacial dos componentes fonte/peça/observador e que irá relacionar o quanto a fase de um speckle varia em função de um deslocamento da superfície. Este vetor é denominado **vetor sensibilidade (p)** e relaciona-se com a própria sensibilidade da Holografia Eletrônica para medição de deslocamentos, como será visto a seguir.

### 3.2 - HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

Como já citado, algumas técnicas interferométricas para medição de deslocamentos utilizando imagens tiveram um forte desenvolvimento com o recente surgimento dos sistemas digitais de processamento de imagens. A Holografia Eletrônica (HE) também conhecida como ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) ou TV Holography, aparece nesse contexto, incorporando à Interferometria Speckle a rapidez e confiabilidade característicos de tais sistemas.

#### 3.2.1 - Princípio Operacional

Quando se faz a superposição de dois padrões de speckle, como resultado se obtém um novo padrão, cujos speckle têm suas intensidades relacionadas às intensidades individuais e à diferença de fase entre os speckle originais. Na HE, esta interferência se faz entre o padrão da superfície a analisar e uma onda luminosa de referência, que pode vir de outro padrão de speckle ou diretamente da fonte de iluminação. O padrão resultante é captado por um CCD (Charge Coupled Device), que é o elemento ativo de uma moderna câmera de vídeo. A figura 3.5, ilustra este processo.

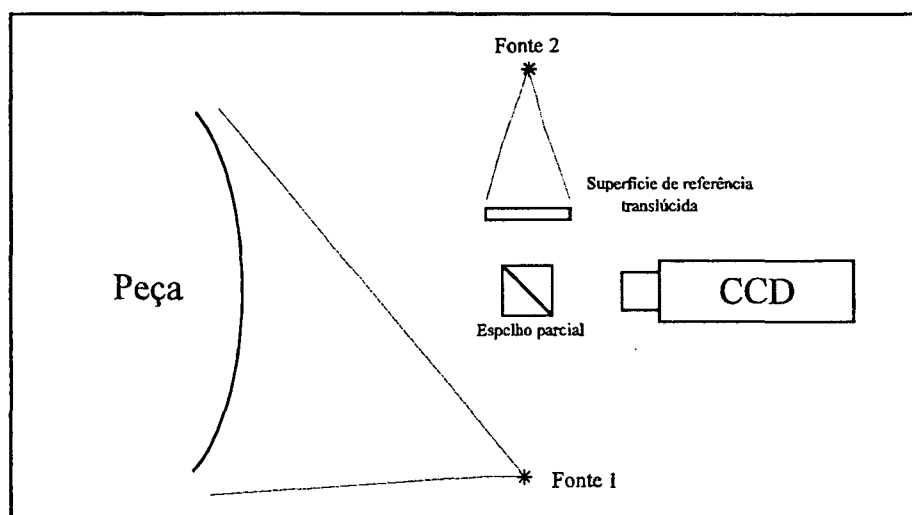


Figura 3.5 - Superposição de padrões de speckle sobre o CCD

O CCD é composto por uma matriz de pequenos fotodetetores denominados de "píxeis" que convertem a intensidade luminosa dos speckle em sinais elétricos proporcionais que são então digitalizados e armazenados no sistema de processamento de imagens. A abertura numérica do sistema óptico responsável pela projeção da imagem dos padrões de speckle sobre o CCD é ajustada de forma que o tamanho médio de um speckle seja equivalente ao tamanho de cada píxel. Assim, cada speckle pode ser individualmente registrado pelo sistema.

Ao se solicitar uma peça com um carregamento qualquer, provocam-se deslocamentos superficiais e a alteração das intensidades dos speckle sobre a peça, conforme item 3.1.2. Na HE são comparados padrões de speckle referentes a diferentes estados de carregamento:

1) Em um instante inicial a imagem da interferência dos dois padrões de speckle é gravada pelo sistema de processamento de imagens, correspondendo à peça na condição de referência. As intensidades dos speckle nesta condição são dadas por:

$$I_i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (3.13)$$

onde

$I_1, I_2$  = Intensidade dos speckle individuais

$\Delta\phi$  = Diferença de fase, ponto a ponto, entre os speckle

2) A seguir, aplica-se um carregamento físico qualquer (esforço mecânico, aquecimento, etc) provocando deslocamentos na superfície e conseqüente alteração no padrão de speckle, sendo esta imagem também gravada pelo sistema. As intensidades dos speckle nesta nova condição passam a ser

$$I_f = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi + \delta) \quad (3.14)$$

onde

$\delta$  = Alteração de fase dos speckle com o deslocamento da superfície

Estas imagens são subtraídas digitalmente ponto a ponto e o valor absoluto da diferença é mostrado em monitor de TV. Pontos que apresentarem a mesma intensidade nas imagens inicial e final ( $I_i = I_f$ ) irão resultar em um valor nulo, ou preto na imagem. Do mesmo modo, em pontos que apresentarem variação de intensidade ( $I_i \neq I_f$ ) o resultado da subtração dará um valor não nulo, ou um tom de cinza na imagem. Por causa da variação cíclica das intensidades dos speckle (em função de  $\delta$ ) aparecem linhas claras e escuras na imagem resultante (franjas de interferência), relacionadas ao campo de deslocamentos experimentado pela peça em função da carga (Fig. 3.6), resultando no **mapa de franjas**. Este processo de subtração é realizado a uma frequência (30 Hz) que torna possível observar em tempo real o movimento das franjas à medida em que o carregamento é aplicado.

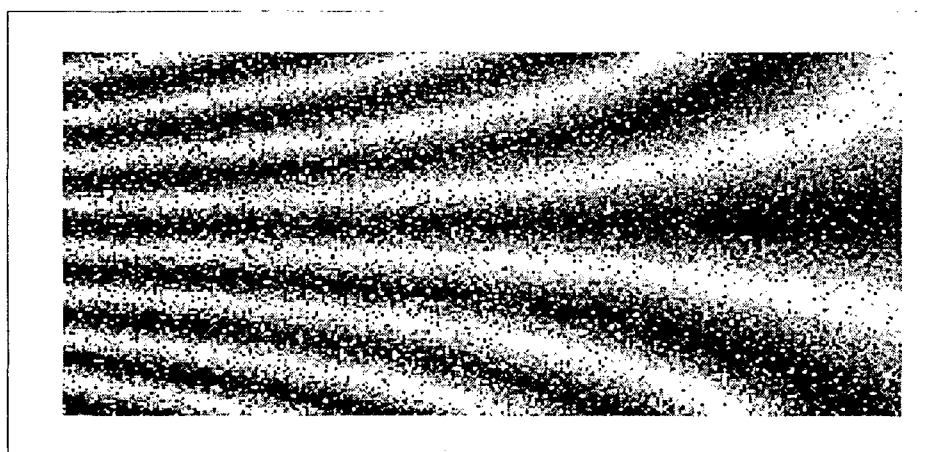


Figura 3.6 - Mapa de franjas

Para o registro das intensidades dos speckle pela câmera, há a necessidade de uma correlação ponto a ponto entre os speckle e o píxeis do CCD (cada píxel registra individualmente um speckle). Grandes deslocamentos na superfície poderão fazer com que o speckle saia de seu píxel, perdendo-se a correlação entre os dois e levando à destruição do mapa de franjas.



Para efeitos de análise, mantidos constante o vetor sensibilidade e a direção do deslocamento, as franjas de interferência são equivalentes a curvas de nível em mapas topográficos. Pontos que estiverem sobre a mesma linha, ou ordem de franja (**OF**), terão sofrido o mesmo deslocamento, havendo um incremento constante de deslocamento entre franjas adjacentes. Deste modo, ao se localizar pontos de deslocamento conhecido sobre a peça, correspondendo à **OF** absoluta, pode-se medir os deslocamentos ao longo de toda a superfície. Esta possibilidade de visualização de todo um campo de deslocamento sobre uma superfície é um dos atrativos da **HE**, sendo por isso uma técnica de campo completo.

O incremento de deslocamento entre duas franjas vizinhas é dado pela equação 3.11, aqui apresentada na forma

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda \cdot OF \quad (3.15)$$

onde

$\vec{p}$  = Vetor de sensibilidade do sistema

$\vec{d}$  = Deslocamento sofrido pela superfície

$\lambda$  = Comprimento de onda do Laser utilizado

**OF** = Ordem de franja, contada a partir da ordem de franja absoluta

Ou seja, para o maior valor possível do vetor de sensibilidade ( $P_{max} = 2$ ) teremos um incremento constante de  $\lambda/2$  para franjas vizinhas. No caso do Laser de He-Ne, este valor corresponde a  $0,3164 \mu m$ .

Apesar do recurso de observação das franjas ao vivo ser bastante explorado para operações qualitativas, em que se procura somente observar o comportamento das franjas para localizar defeitos em peças, análises quantitativas sobre mapas de franjas apresentam algumas limitações, como será visto a seguir.

### 3.2.2 - Mapas de Fase

A utilização eficiente da HE para quantificação de deslocamentos implica na aquisição confiável e de forma automática das informações contidas nos mapas de franjas. No entanto, o aspecto grosseiro do speckle, mantido relativamente grande pela abertura da câmera CCD, provoca ruídos sobre a imagem dificultando a visualização e localização exata das regiões onde as ordens de franjas são inteiras bem como a determinação dos valores fracionários. Isto aumenta bastante a incerteza da análise quantitativa sobre um mapa de franjas.

Existem diversas técnicas utilizadas para extração das informações destes mapas, como técnicas de localização dos picos das franjas por varredura sobre o mapa de franjas [23] [24], e técnicas de medição da fase dos speckle [25].

O método do deslocamento de fase (Phase Shift) [26] é uma das técnicas mais utilizadas para extração automática da ordem de franja ponto a ponto sobre toda a imagem e possibilita determinar a fase dos speckle provenientes do objeto, relativamente ao padrão óptico de referência.

A técnica consiste basicamente em se deslocar a fase de uma das frentes de onda em relação à outra e adquirir imagens dos padrões de speckle ao longo deste deslocamento. Após isso, as intensidades de cada speckle contidas nestas imagens são combinadas matematicamente, ponto a ponto, obtendo-se o valor da fase.

Existem algumas variações dentro deste método, em relação ao número de imagens que se adquire ao longo do deslocamento. Nos experimentos realizados neste trabalho, utilizou-se o método dos quatro passos [25]. Ao se deslocar um feixe em relação ao outro, são

adquiridas 4 imagens correspondentes a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  de deslocamento de fase. As intensidades são dadas pela equação 3.5, resultando para o caso:

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi)$$

$$I_{90} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + 90^\circ)$$

$$I_{180} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + 180^\circ)$$

$$I_{270} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + 270^\circ)$$

Efetuada-se a combinação matemática destas intensidades, obtém-se:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{(I_{270} - I_{90})}{(I_{180} - I_0)}$$

e portanto

$$\phi = \arctg \frac{(I_{270} - I_{90})}{(I_{180} - I_0)} \quad (3.16)$$

Os valores de  $\phi$  são representados no vídeo, ponto a ponto, em escala equivalente de nível de cinza. Pontos que apresentem fase  $0^\circ$  serão mostrados em nível de cinza 0 e pontos com fase relativa  $360^\circ$  corresponderiam ao nível 256. Esta imagem resultante é chamada de **mapa de fase**.

O mapa de fase de cada padrão de Speckle é totalmente aleatório e, em si, não revela qualquer informação. Somente quando se subtraem os mapas de fase da peça nas condições deformada e indeformada é possível visualizar um mapa de fase resultante, associado ao deslocamento sofrido pela peça em função de um carregamento aplicado.

Na figura 3.7 é possível visualizar um mapa de fase obtido por esta subtração, devendo observar-se o salto do branco (cinza 255) para o preto (cinza 0) que ocorre em algumas regiões. Isto ocorre por ser a variação de fase uma função contínua e devido ao  $\arctg$  fornecer apenas o ângulo cônico de  $\phi$ , dentro da primeira volta. Assim, da fase  $359^\circ$  passa para a fase  $0^\circ$ , com a conseqüente descontinuidade no nível de cinza. Tais descontinuidades são denominadas de **saltos de fase**.

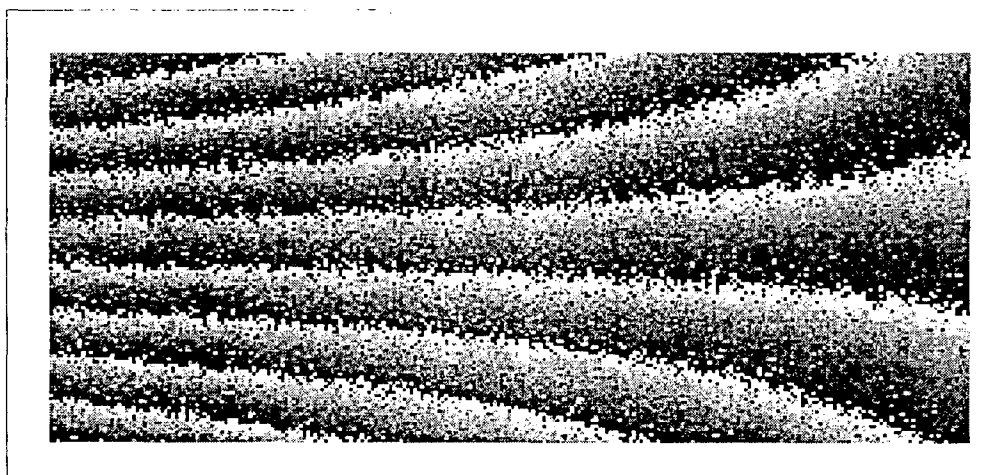


Figura 3.7 - Mapa de fase

Este mapa de fase acima corresponde à discretização do mapa de franjas mostrado na figura 3.6, sendo utilizado para a determinação dos deslocamentos sobre a peça. Cada ordem de franja (OF) é discretizada em 255 níveis, embora ruídos trazidos pelos speckle limitem esta resolução acerca  $1/5$  da ordem de franja. Métodos de redução de ruídos podem melhorar esta resolução para  $1/30$  da OF. Alguns destes métodos serão resumidamente descritos no item 3.3, no decorrer do trabalho.

### 3.2.3 - Configurações utilizadas

Como visto na equação 3.12, existe um parâmetro geométrico dependente do posicionamento relativo entre os componentes físicos do sistema, que determina o quanto a fase do speckle varia em função de um deslocamento da superfície. Como o processo de medição com HE se baseia nesta variação de fase, esta configuração espacial determina o quanto e em que direção a montagem será sensível para medição de deslocamentos.

Na HE dois tipos de configuração podem ser utilizados, separadamente ou de forma combinada, proporcionando sensibilidade adequada em todas as direções de deslocamento sobre a peça.

#### 3.2.3.1 - Iluminação simples

Neste tipo de configuração, a peça é iluminada por um feixe de Laser e o padrão de Speckle resultante sobre ela é superposto com uma outra onda luminosa, que pode ser outro padrão de speckle de uma superfície de referência ou a luz direta do próprio Laser. Esta superposição é então visualizada pela câmera, como na figura 3.8.

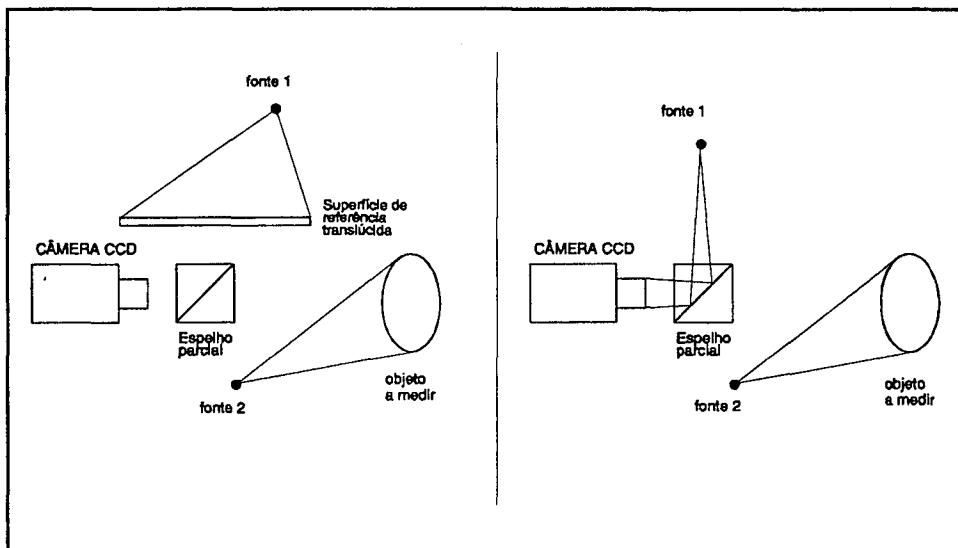


Figura 3.8 - Configurações de iluminação simples

Ao ser solicitada por um carregamento, somente o padrão de Speckle da peça irá variar, dado que a referência permanece inalterada. Com isto, o padrão resultante da superposição irá variar para diferentes estados de carregamento, gerando as franjas de interferência. O vetor de sensibilidade resultante desta configuração é dado pela soma vetorial dos vetores unitários, ( $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_2$ ) nas direções de iluminação e observação (fig 3.9). Esta configuração é adequada para a medição de deslocamentos normais à superfície da peça.

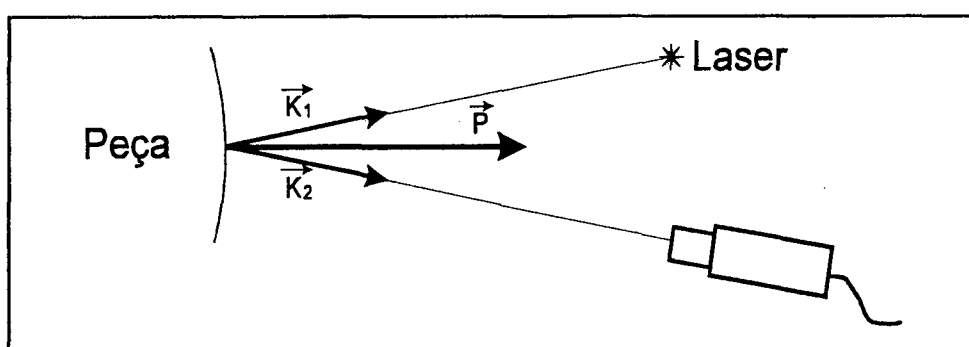


Figura 3.9 - Sensibilidade: Iluminação simples

### 3.2.3.2 - Iluminação Dupla

Nesta configuração a peça é iluminada simultaneamente por dois feixes de Laser (fig 3.10). Os dois padrões de Speckle resultantes desta iluminação interferem, formando um novo padrão.

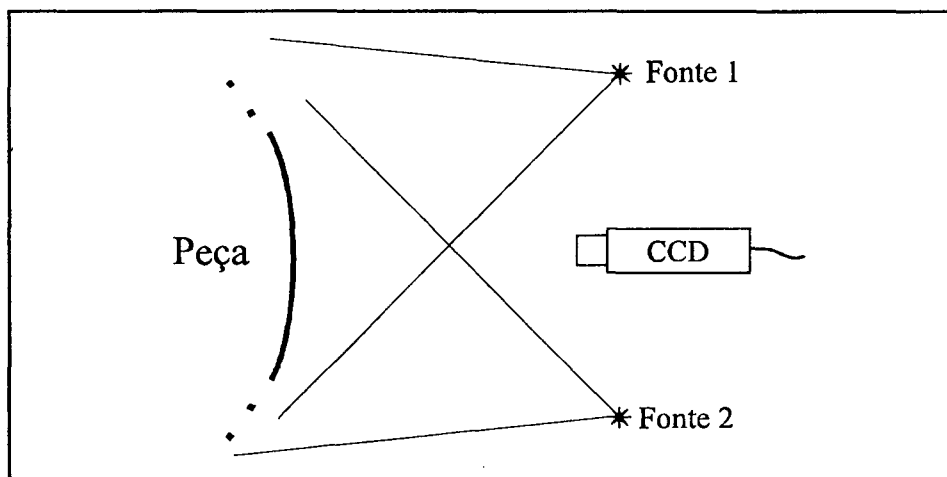


Figura 3.10 - Configuração de Iluminação dupla

Se a superfície se desloca, os padrões de speckle individuais alteram sua fase, resultando em variações na intensidade a ser captada pelo CCD. Pode-se demonstrar, usando-se a mesma análise sobre a variação de fase dos speckle (eq. 3.12), que o vetor sensibilidade resultante desta configuração será dado pela subtração vetorial entre os vetores sensibilidade individuais, obtidos pelas duas iluminações simples utilizadas ao mesmo tempo (fig 3.11).

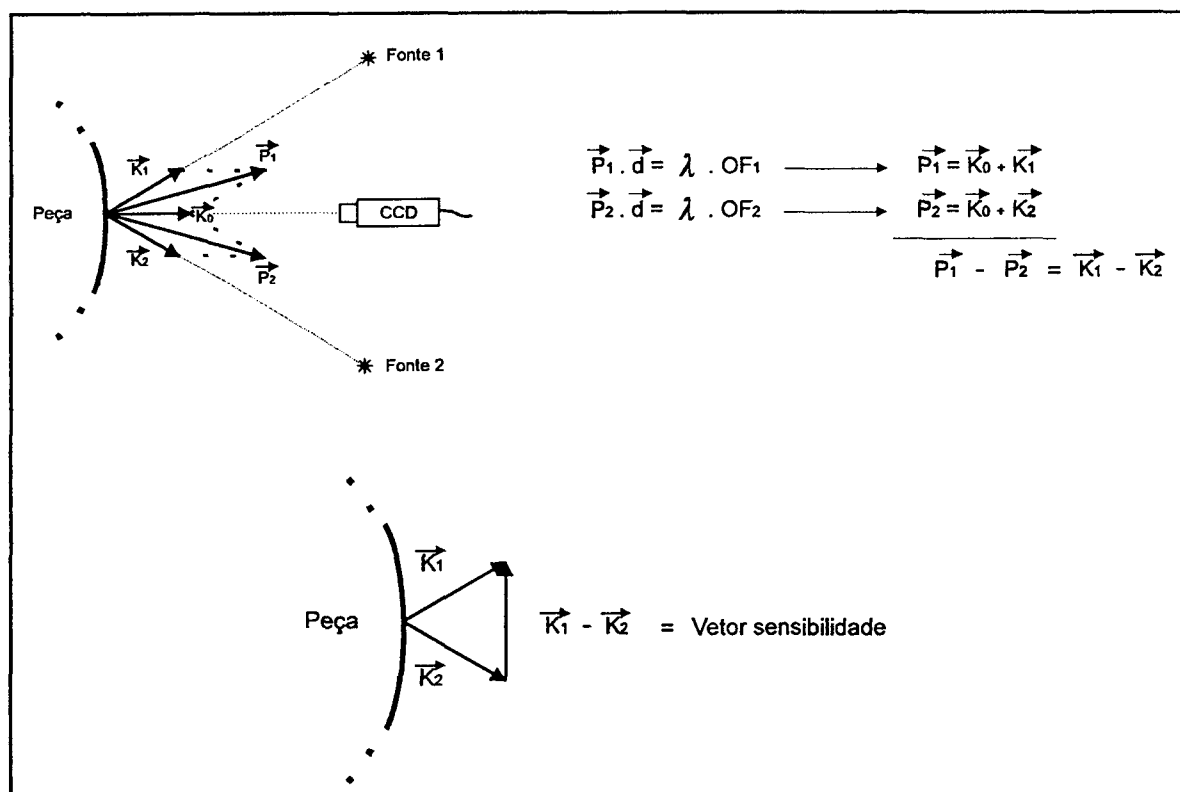


Figura 3.11 - Sensibilidade: Iluminação dupla

Pode-se observar a adequação desta configuração para medição de deslocamentos paralelos à superfície da peça, bem como torna-se indiferente a posição em que se encontra o observador.

A utilização combinada destes dois tipos de iluminação acima descritos é empregada para caracterizar, de forma eficiente, deslocamentos nas três direções ortogonais, combinando as sensibilidades adequadas a deslocamentos normais e paralelos à superfície da peça, fornecidas pelos arranjos de simples e dupla iluminação, respectivamente.

### 3.2.4 - A Estação Holográfica

O sistema Estação Holográfica [27] consiste de um conjunto de elementos mecânicos, ópticos, eletrônicos e computacionais, desenvolvidos e agrupados para flexibilizar o uso da holografia eletrônica em análises experimentais de materiais e peças. Todo o processo de montagem e execução de experimentos, processamento e análise de resultados, é gerenciado por um software dedicado, o SINTHE 3.0 (Sistema Integrado de Holografia Eletrônica), tornando o sistema flexível e gerando uma interface "amigável" com o usuário. São alguns de seus recursos:

- Análise da montagem utilizada
- Visualização de franjas ao vivo
- Cálculo e processamentos de mapas de fase
- Cálculo de deslocamentos, deformações e tensões
- Análise gráfica e documentação dos resultados obtidos

Abaixo na figura 3.12 tem-se uma visão geral da Estação Holográfica, com alguns de seus componentes. Este sistema foi utilizado neste trabalho para os diversos experimentos, constituindo grande parte da infra-estrutura experimental básica para sua realização.

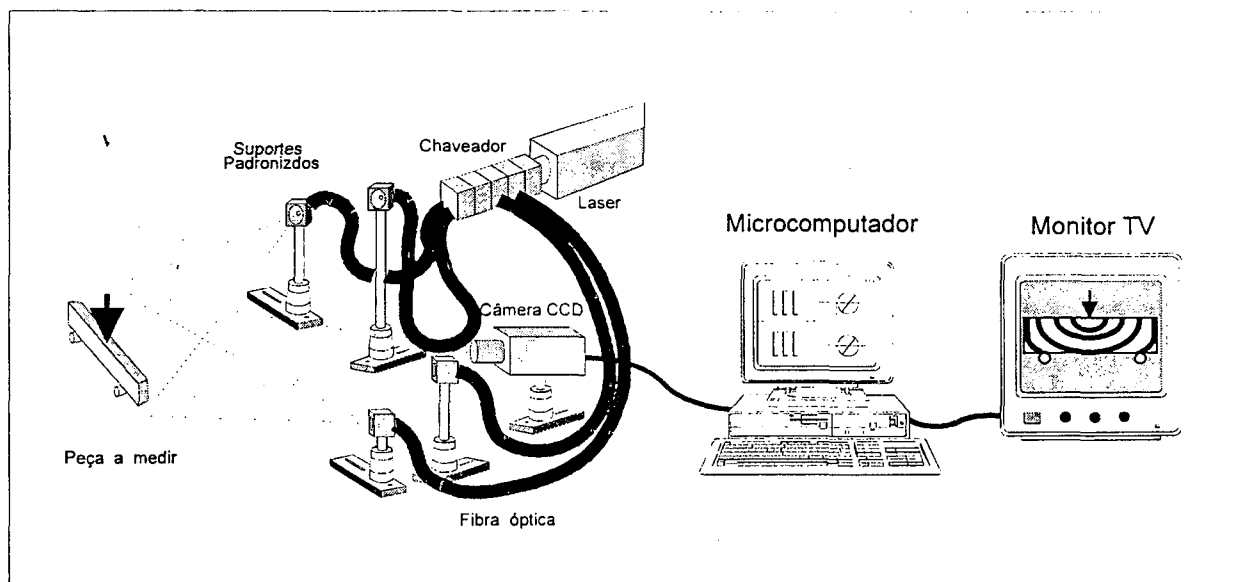


Figura 3.12 - Visão geral da Estação Holográfica



### 3.3 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A utilização eficiente e confiável da HE em operações quantitativas ou qualitativas depende em grande parte dos processamentos que são realizados sobre as imagens resultantes do processo, os mapas de fase.

**Processamento de imagens** é um termo geral aplicado às diversas operações que alteram imagens digitalizadas, de modo a extrair delas o máximo de informações significativas [28]. No texto a seguir, este assunto será abordado de forma resumida e direcionada para as aplicações realizadas sobre as imagens obtidas ao longo dos experimentos neste trabalho.

#### 3.3.1 - Fundamentos

Quando uma câmera CCD capta as intensidades luminosas de uma imagem e os sinais resultantes são digitalizados, um processo de amostragem é empregado para representar esta imagem através de um conjunto discreto de números. Como resultado, obtem-se uma matriz de dados (512 x 512) onde cada elemento (*Picture element* ou *Pixel*) recebe um valor associado à intensidade luminosa da imagem inicial.

Matematicamente esta imagem é definida por uma função de duas variáveis: as coordenadas especiais de cada pixel, e os valores assumidos pela função são representativos do nível de cinza da imagem digitalizada. A figura 3.13 ilustra o processo de digitalização ocorrido em uma imagem simples, bem como sua representação matemática.

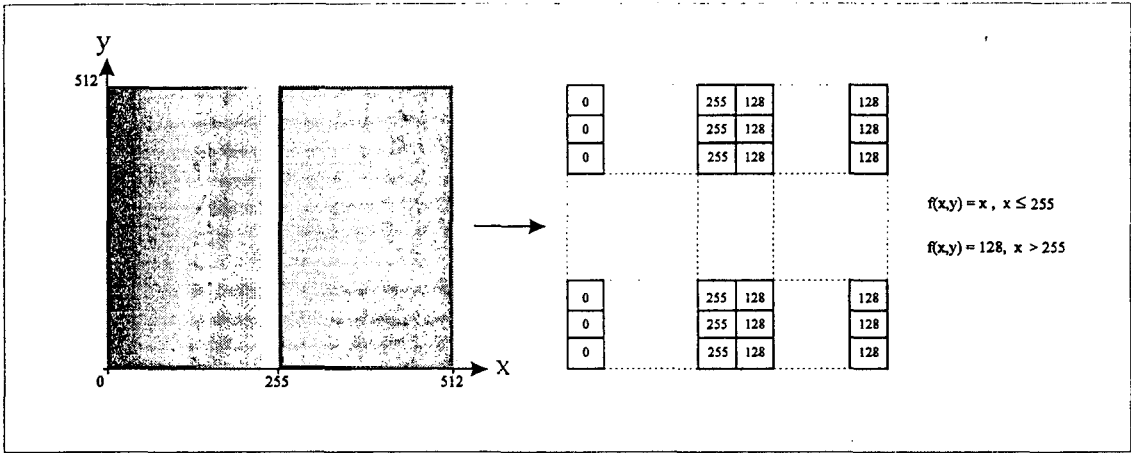


Figura 3.13 - Imagem Digitalizada

Este arquivo digitalizado e sua imagem podem ser manipulados de diferentes modos, resultando em alterações de posição, aparência e intensidade da imagem original, sendo utilizadas para corrigir o contraste, combinar duas imagens, ressaltar ou ocultar detalhes, deslocar ou deformar imagens, etc.

3.3.2 - Operações de Processamento de Imagens

As operações de processamento realizadas sobre imagens digitalizadas podem ser classificadas basicamente em três tipos [29]:

a) Operações pixel a pixel

Neste tipo de operação, os valores dos píxeis são alterados um por um, de acordo com alguma transformação, e os resultados em cada ponto dependem somente de seu valor inicial e da operação sobre ele realizada, não sendo influenciado por qualquer outro pixel.

Operações algébricas como soma ou subtração de uma constante, alterando o brilho, e multiplicação ou divisão, alterando o contraste, são operações bastante aplicadas para alteração dos níveis de cinza de uma imagem.

A distribuição dos píxeis de acordo com seu nível de cinza, através de um histograma, permite a análise do brilho e do contraste na imagem. A soma ou subtração de uma constante à imagem simplesmente desloca a curva do histograma, sem alterar seu formato, ao passo que a multiplicação por um fator apropriado pode fazer com que a distribuição de intensidades da imagem ocupe toda a faixa no histograma (0 a 255) sendo esta operação conhecida como **equalização de histograma**. A figura 3.14 ilustra as operações de soma e multiplicação de uma imagem por uma constante, e o efeito disto no histograma.

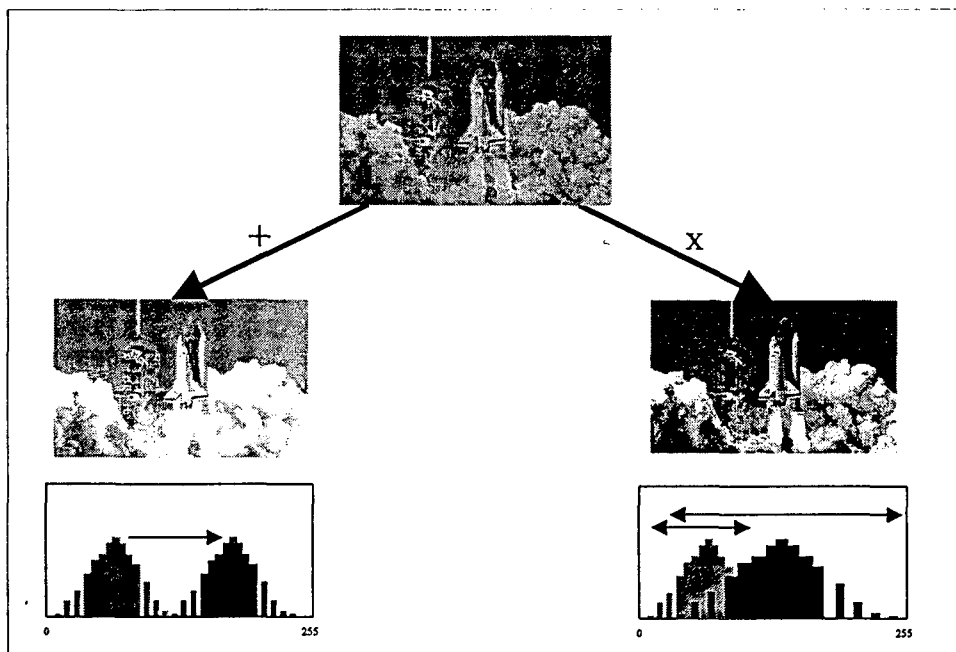


Figura 3.14 - Operações algébricas

Além das operações algébricas de valores constantes sobre imagens, combinações algébricas e lógicas entre imagens distintas são outras formas de operação pixel a pixel bastante utilizadas.

## b) Operações Locais

O valor resultante deste tipo de operação em um pixel depende somente dos valores dos píxeis na sua vizinhança. A operação mais utilizada é a **convolução espacial**, que consiste basicamente em uma combinação linear das intensidades dos píxeis vizinhos àquele que receberá o valor resultante desta operação.

Operacionalmente, isto é feito "deslocando-se" uma matriz de valores (máscara de coeficientes multiplicativos) sobre a imagem. A soma resultante da multiplicação ponto-a-ponto é atribuída ao elemento central desta matriz e à medida que esta se "desloca", efetua a operação sobre toda a imagem. O resultado dependerá do tamanho desta máscara e de seus coeficientes. Tais operações são bastante utilizadas para remoção de ruídos, evidenciação de detalhes, visualização de contornos, etc. [30].

## c) Operações Geométricas

Estas operações apresentam a característica de que o valor resultante em um ponto é somente função do valor de um outro ponto ou região, definidos pela transformação geométrica aplicada. Com isto consegue-se alterar forma, localização e tamanho da imagem original através de operações como translação, rotação, distorção, "zoom", etc..

Na figura 3.15 pode-se visualizar a translação ocorrida na direção x em uma imagem binária com 16 píxeis de resolução espacial em cada direção.

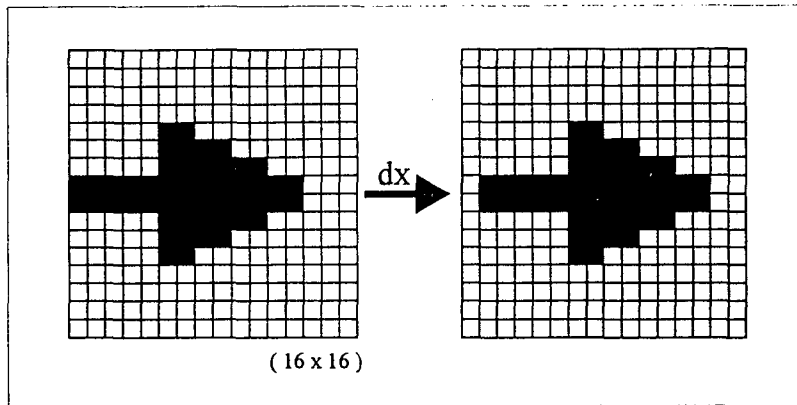


Figura 3.15 - Translação em imagem digitalizada

Algumas operações avançadas de processamento utilizam recursos da transformada rápida de Fourier (FFT) para otimização de imagens. A FFT bidimensional, aplicada sobre a imagem, converte os dados do domínio do espaço para o domínio da frequência, permitindo a manipulação das frequências contidas na imagem e possibilitando filtrações extremamente flexíveis. Rotação e "zoom" em imagens são também realizadas [31] [32].

Para remoção dos ruídos de alta frequência causados pelos speckle nos mapas de fase, foram utilizados neste trabalho os recursos de filtração FFT contidos no software de processamento de imagens do sistema Estação Holográfica. A figura 3.16 ilustra o resultado de uma filtração FFT sobre um mapa de fases. Variações bruscas de níveis de cinza devido aos ruídos dos speckle são eliminados, visualizando-se com clareza os contornos dos saltos de fase.

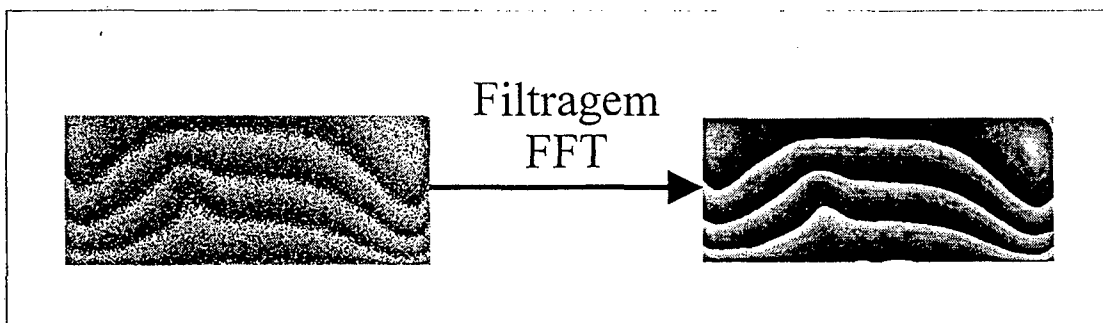


Figura 3.16 - Filtragem utilizando FFT bidimensional

### 3.3.3 - Derivada de imagens

Além das operações acima descritas, ao longo do trabalho foram testados e implementadas outras formas de processamento de imagens. As operações de diferenciação sobre a imagem foram extensivamente testadas, obtendo-se resultados bastante significativos nas análises realizadas.

Seja  $f(x,y)$  a função discreta definida pela distribuição de intensidades (nível de cinza) ao longo de uma imagem. A diferenciação desta função em relação a duas direções ortogonais,  $x$  e  $y$ , irá ressaltar nestas direções, em que locais na imagem o nível de cinza varia de forma diferenciada do restante da imagem. Deste modo, operadores diferenciais podem ser utilizados em processamento de imagens para evidenciar detalhes, em meio a um padrão dominante.

O processador gráfico COREL 4.0 [33] utiliza este mesmo recurso para causar um efeito de sensação de profundidade (3D) quando aplicado sobre imagens.

Como os dados digitalizados na imagem estão distribuídos discretamente e regularmente espaçados, a derivada de uma imagem é implementada por simples diferenças entre píxeis vizinhos, normalmente utilizando convolução espacial com máscara do tipo  $[-1, 1, 0]$ . Deste modo, a menos de uma constante multiplicativa, as derivadas podem ser calculadas por:

$$\frac{df}{dx} = f(x, y) - f(x-1, y) \quad (3.18)$$

e

$$\frac{df}{dy} = f(x, y) - f(x, y-1) \quad (3.19)$$

Esta derivadas apresentam a limitação de ressaltar variações de cinza ocorridas somente em uma direção, descartando variações em qualquer outra. Esta limitação é superada quando se utiliza um **operador isotrópico**, que resalta variações de cinza ocorridas em qualquer direção, independentemente da posição da imagem, sendo invariantes em relação a rotações ocorridas.

Neste trabalho testou-se o **gradiente** de uma imagem como operador isotrópico para processamento de imagens, objetivando-se evidenciar detalhes. Matematicamente, o gradiente é uma derivada direcional e fornece a taxa de variação de uma função sempre na direção em que esta variação ocorre em maior magnitude. Sejam  $\frac{df}{dx}$  e  $\frac{df}{dy}$  as derivadas nas direções x e y, respectivamente, o gradiente é definido por:

$$\frac{df}{ds} = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2} \quad (3.20)$$

Se este operador é aplicado sobre um mapa de franjas, a derivada é feita sempre na direção de maior variação da ordem de franja, como mostra a figura 3.17

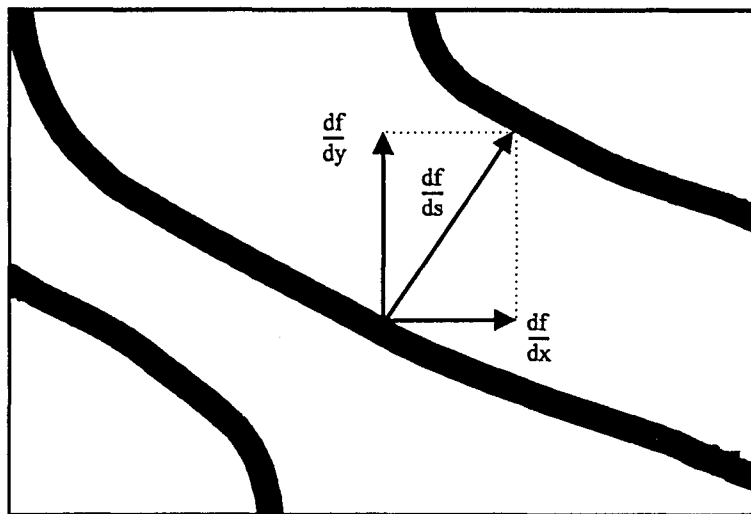


Figura 3.17 - Gradiente

O procedimento utilizado neste trabalho para realização desta operação encontra-se descrito no fluxograma na figura 3.18. Para melhora na visualização dos resultados foi feita a equalização dos histograma<sup>3</sup> destas imagens.

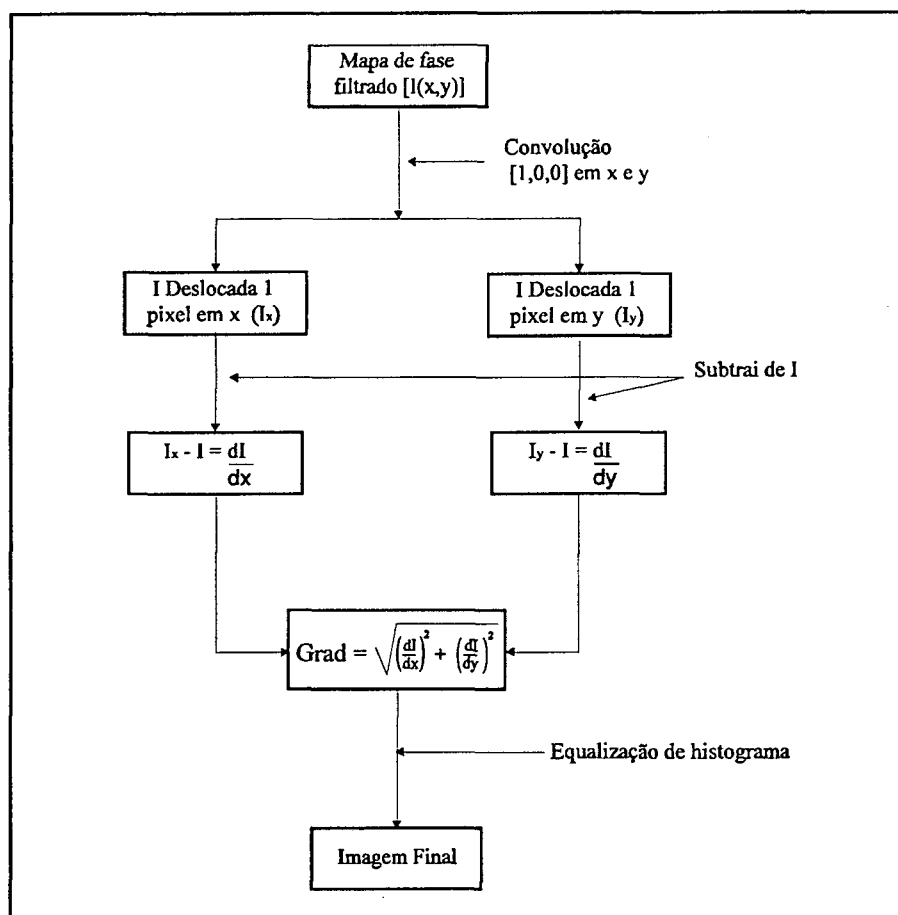


Figura 3.18 - Fluxograma do Gradiente sobre Imagem

<sup>3</sup>Para fazer os níveis de cinza ocuparem toda a faixa do histograma (0→255) foi aplicado sobre as imagens o algoritmo:

$$I_f = \frac{(I_i - Pix_{\min})}{Pix_{\max} - Pix_{\min}} \cdot 255 \quad \text{onde}$$

$I_f$  = Imagem final

$I_i$  = Imagem inicial

$Pix_{\max}$  = maior valor de cinza da imagem

$Pix_{\min}$  = menor valor de cinza da imagem



A figura 3.19 mostra o resultado do gradiente e da equalização de histograma sobre um mapa de fase resultante de uma peça de plástico com uma inclusão metálica, submetido a aquecimento. A destacar a maior facilidade de localizar a inclusão e delinear seu contorno bem como a sensação visual de profundidade que a imagem apresenta.

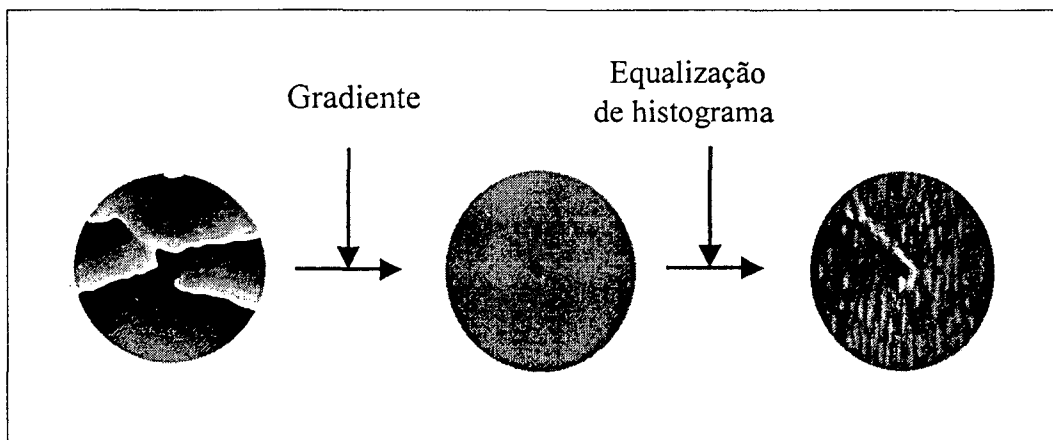


Figura 3.19 - Gradiente e equalização de histograma sobre um mapa de fase

### 3.4 - UTILIZAÇÃO DA HE + PI PARA ENSAIOS-NÃO-DESTRUTIVOS

#### 3.4.1 - Princípio de funcionamento

A utilização de várias técnicas interferométricas<sup>3</sup> em NDT para inspeção é levada a efeito sempre pela observação do tipo de resposta apresentada pela superfície de um corpo, evidenciada pelas franjas de interferência, quando um carregamento físico (esforço mecânico, calor, pressão, etc.) é aplicado sobre ele. Procuram-se identificar anormalidades que denunciem a existência de defeitos.

Existem basicamente duas formas de identificação de defeitos utilizando este princípio:

- a) Padronizando-se a resposta apresentada por uma peça considerada sem defeitos (padrão) e a partir disto comparando-se este padrão com as peças a serem testadas, qualificando-as de forma **comparativa**.
- b) Identificando a região defeituosa diretamente sobre a peça. Neste caso, a comparação é feita com diferentes regiões da mesma peça e o defeito provoca um efeito superficial que torna possível sua localização em meio ao restante da superfície. Neste caso a qualificação é feita de forma **indicativa**.

A qualificação comparativa pode ser aplicada se o carregamento for bem controlado, e provocar na peça respostas bem repetitivas. A qualificação indicativa é o modo mais utilizado, dado que permite maior margem de variação nos resultados, embora requeira do carregamento um efeito bastante pronunciado sobre regiões defeituosas.

---

<sup>3</sup>Moiré, Shearography, Holografia interferométrica, Interfometria Speckle e Holografia eletrônica, entre outras [34].

Em ambos os casos, o grande desafio enfrentado pelos experimentalistas tem sido encontrar formas adequadas de carregamento que provoquem, em peças defeituosas, uma resposta diferenciada da resposta natural de uma estrutura perfeita [35 - 37], e que isto apresente boa repetibilidade. Muito já se trabalhou nesta área e existem até alguns carregamentos satisfatoriamente utilizados de forma semelhante em uma série de casos. No entanto cada caso possui particularidades que exigem estudos e procedimentos próprios.

### **3.4.2 - Requisitos operacionais**

A HE, enquanto ferramenta de NDT, deve apresentar alguns requisitos operacionais, necessários para sua aplicação eficiente, principalmente em um meio industrial:

- (1) Facilidade de utilização com um mínimo de treinamento pelo operador;
- (2) Repetibilidade nos resultados dos testes;
- (3) Facilidade de interpretação dos resultados;
- (4) Eliminação ou mínima influência do meio ambiente nos resultados;
- (5) Custo atrativo.

Como a utilização da HE para inspeção depende fundamentalmente de se encontrar modos adequados de carregar fisicamente uma peça e analisar a sua resposta a este esforço, o tipo de carregamento e a direção de sensibilidade são os pontos chave a serem trabalhados.

Em essência, o carregamento físico é o agente excitador por intermédio do qual procura-se avaliar o comportamento do corpo, tanto qualitativa como quantitativamente. Nos ensaios quantitativos, o carregamento é normalmente aplicado de forma a simular o comportamento que o material/peça sofreria em uso, e assim sendo, é geralmente definido pela condição de utilização do elemento a analisar. Pistões automotivos submetidos a carregamentos térmicos, e vasos de pressão submetidos a pressurização interna são exemplos de ensaios de peças em que se tenta simular suas condições de utilização.

Nos ensaios qualitativos, o carregamento aplicado tem uma importância relativamente maior para o processo do que nos ensaios quantitativos, não estando tão ligado à condição de utilização do elemento, mas sim ao tipo de material e à propriedade a inspecionar. A partir de um carregamento correto e adequadamente aplicado é possível diferenciar peças boas e defeituosas e/ou localizar imperfeições localizadas em uma peça.

Ao lado de um carregamento adequado, o sistema deve apresentar uma sensibilidade à observação dos deslocamentos compatível com a direção dos deslocamentos apresentados pela superfície do corpo em função do carregamento, exigindo do sistema uma montagem óptica eficiente.

### **3.4.3 - Estudo de casos: Carregamento x Defeito x Material**

Sabendo-se que a evidenciação de uma falha com HE é baseada na comparação de dois estados de deformação de um corpo, o desenvolvimento de uma técnica de inspeção com este princípio torna-se essencialmente o desenvolvimento de modos práticos e adequados de carregar o objeto.

Carregar a peça de modo similar ao de operação pode ser difícil ou impraticável, ou ainda não possibilitar a detecção de alguns defeitos, pela forma da resposta oferecida pela peça ao carregamento [36]. Deste modo, procuram-se aplicar também outras formas de carregamentos de modo a contornar estas dificuldades.

Existem basicamente cinco tipos de carregamentos práticos de aplicação em corpos, para efeitos de detecção de defeitos com Interferometria. [38, 39]

- 1) Carregamento Mecânico
- 2) Pressurização
- 3) Carregamento Térmico
- 4) Vibração
- 5) Carga de Impacto

Não existe uma regra definida sobre o tipo de carregamento a utilizar para cada caso específico. Deve-se considerar o tipo de material (estrutura, comportamento mecânico etc.), e o defeito (tipo, mecanismo de formação, forma de apresentação, etc.) a testar e analisar os carregamentos disponíveis e as prováveis respostas do material à sua aplicação, quando será possível também definir-se a direção de sensibilidade adequada, obtida através de montagem óptica compatível.

De acordo com isto, e com o histórico de algumas técnicas de carregamento já consagradas para certos casos, pode-se obter uma orientação inicial na direção de certas opções, mas haverá mesmo assim uma grande parcela de incerteza no sucesso da operação, somente verificada através de experimentação.

A seguir será feita uma análise a partir de histórico de trabalhos relacionados a NDT utilizando técnicas interferométricas, separando-os de acordo com o tipo de carregamento empregado, destacando-se suas aplicações mais consagradas, restrições à sua aplicação, e casos potenciais em que se apresentam mais promissores.

## **1 - Carregamentos Mecânicos**

Referem-se normalmente à aplicação de esforços mecânicos diretos, com a visualização das deformações conseqüentes. Compreendem as forças de superfície (concentradas ou distribuídas) e forças de corpo, levando o corpo a sofrer flexões, torções, trações, flambagem, etc., que possibilitem a localização de defeitos pelo tipo de deslocamento oferecido por sua superfície em função destes esforços.

Normalmente não se apresenta como uma alternativa muito prática já que, dependendo da resistência do material, podem ser necessários grandes esforços, necessitando de aparatos robustos, além do que se faz necessário o contato entre peça e carregador, aumentando a possibilidade de ocorrência de grandes deslocamentos de corpo rígido, causando o aparecimento de uma alta densidade de franjas ou mesmo perda de correlação, prejudicando a sensibilidade do sistema ao defeito. Algumas técnicas de compensação procuram corrigir isto, mas nem sempre são práticas ou mesmo viáveis de aplicação [40 - 43].

São mais adequadas para detecção de defeitos em elementos que não apresentam alta rigidez frente ao carregamento empregado ou em materiais de baixo módulo de resistência como os polímeros, por exemplo.

Na literatura, os carregamentos mecânicos têm sido aplicados em sua maioria na detecção de trincas em estruturas [44], e na inspeção de delaminações em materiais compostos [45]. Existem, também, algumas análises de fadiga em peças de materiais compostos utilizando carregamento mecânico [38].

Na detecção de trincas, o carregamento deve ser sempre aplicado de forma a forçar um deslocamento relativo entre as partes separadas pela trinca. A observação de tal defeito torna-se possível por uma "quebra" ou descontinuidade na franja quando a mesma se situa sobre a trinca [46]. Quando aplicado sobre delaminações em compostos, normalmente procura-se causar uma flambagem de uma das camadas laminadas, no sentido do observador, com a sensibilidade devendo ser otimizada para detectar deslocamentos normais à superfície (Fig. 3.20). Normalmente, a flexão pura apresenta-se como a melhor opção para isto.

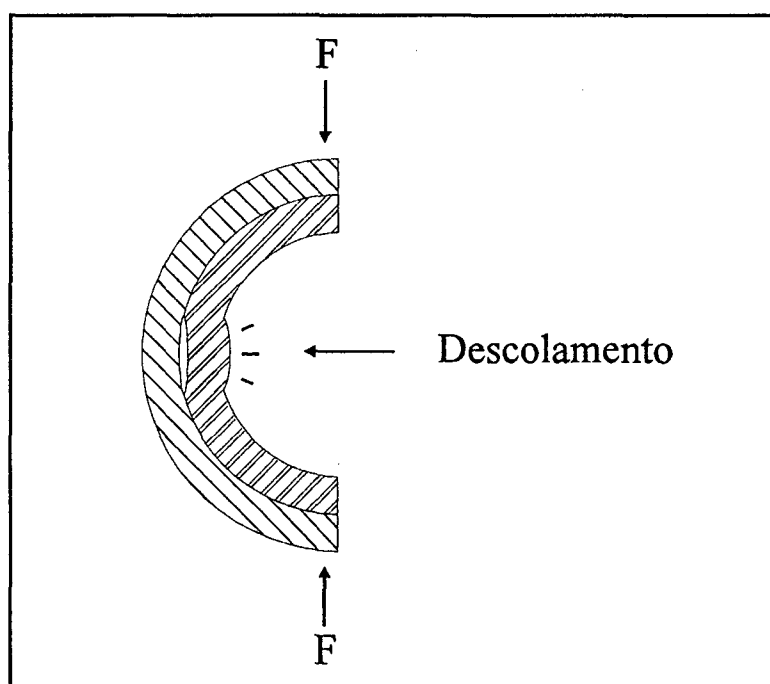


Figura 3.20: flexão em bronzina

Pode-se tentar forçar o deslocamento de uma camada sobre a outra como forma de causar um deslocamento anormal da área defeituosa em relação ao restante do material, dada a maior liberdade de deslocamento da região descolada. A sensibilidade ao deslocamento seria, neste caso, paralela à superfície da peça (Fig.3.21). O cisalhamento de uma camada em relação às demais apresenta-se como uma opção prática de carregamento mecânico.

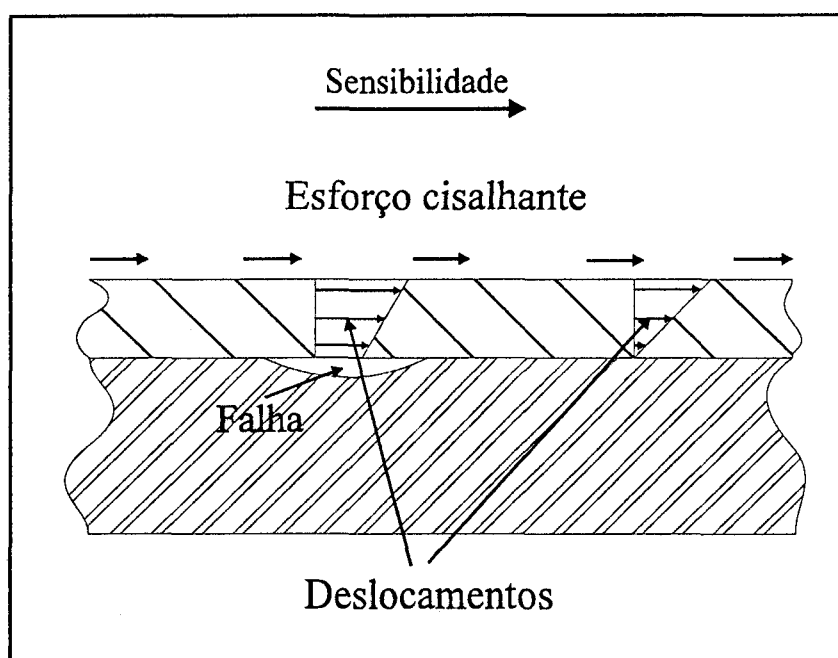


Figura 3.21 - Efeito do cisalhamento sobre região descolada

Os carregamentos mecânicos são também utilizados para simular a condição de utilização real de um determinado componente [47, 48], com o qual procuram-se principalmente visualizar pontos de concentração de tensões no elemento. Devem-se estabelecer as condições mais próximas de seu uso normal. Estes pontos de concentração de tensões poderão denunciar falhas ou limitações de projeto do componente, na estrutura do material ou, ainda, falhas de montagem de um conjunto mecânico [49].



## 2 - Pressurização:

A aplicação de um diferencial de pressão sobre um elemento tem sido um dos meios mais efetivos de carregamento utilizados em NDT com técnicas interferométricas. Contribuem para isso uma relativa praticidade de aplicação, a possibilidade de um bom controle sobre o carregamento, além do tipo de resposta oferecido pelos elementos sob carga, particularmente favorável à detecção de certos defeitos.

Os procedimentos são semelhantes: partindo da pressão atmosférica como condição de referência, a diferença de pressão pode ser aplicada tanto positivamente quanto negativamente, provocando um vácuo parcial, dependendo do componente e da propriedade a inspecionar. Este tipo de carregamento é singularmente apropriado para detecção de falhas de construção em materiais laminados e em elementos que trabalhem ou sejam passíveis de pressurização, como vasos, colméias de trocadores de calor e semelhantes.

A técnica para aplicar o diferencial de pressão depende fundamentalmente da configuração da estrutura. Nos casos em que se inspecionam falhas em materiais pressurizáveis, aplica-se um incremento de pressão no seu interior entre as duas exposições. As aplicações têm sido realizadas principalmente na inspeção de trocadores de calor, tubos e vasos de pressão, buscando-se inspecionar fragilidades estruturais causadas por trincas, vazios e inclusões bem como defeitos de soldagem nestes elementos [38, 45, 47, 50 - 53] .

É, no entanto, aplicando-se vácuo parcial que normalmente se têm utilizado carregamentos de pressão em NDT com interferometria. No teste, o objeto é colocado em uma câmara onde um vácuo parcial pode ser aplicado de tal forma que seja possível, de algum modo, visualizar-se os deslocamentos na superfície da peça conseqüentes deste carregamento.

Os esforços gerados pelo vácuo parcial constituem-se como uma tensão uniforme direcionada normalmente à superfície do elemento, tracionando-o. Devido a esse estado de tensões, o vácuo parcial tem sido aplicado com bons resultados na localização de falhas de adesão e vazios entre camadas de materiais compostos, havendo inclusive casos consagrados de aplicação no meio industrial [38, 54 - 60].

Sendo um esforço estático, sem contato e de fácil controle, tem sido explorado não só para a localização como para a quantificação de defeitos. Com a aplicação do vácuo, cria-se em regiões descoladas uma carga equivalente à pressão aplicada em uma placa presa nas bordas e livre no centro. A partir desta analogia, utilizando a teoria de placas, tenta-se estimar o tamanho do descolamento a partir dos deslocamentos normais à superfície ocorridos pela aplicação de um diferencial de pressão conhecido. No entanto, a confiabilidade nesta medição só tem sido satisfatória mediante condições específicas de forma e material da peça analisada, bem como profundidade dos descolamentos [56, 57].

A razão entre tamanho do defeito e profundidade é crítica. A partir de um certo valor, a resolução da técnica pode ser incapaz de detectar os deslocamentos causados pelo carregamento, já que o diferencial de pressão é logicamente limitado a 100.000 Pa (1 bar). Alguns trabalhos indicam uma razão entre diâmetro do defeito e profundidade igual a 1, como limite imposto. Este número, no entanto, varia de acordo com o material em teste e com a existência de ar na interface descolada [54].

Quando as superfícies de um material laminado estão descoladas mas ainda em contato, existe o que se costuma chamar de "descolamento aderente". Neste caso, o vácuo não costuma se apresentar como um meio efetivo de carregamento. Alguns autores [55] falam da

necessidade de pelo menos alguns micrometros de cavidade estarem presentes na interface descolada para possibilitar a detecção com vácuo. Caso contrário, carregamentos com vibração ou carregamento térmico são provavelmente melhores candidatos.

A deformação que a câmara de vácuo sofre quando do carregamento, juntamente com a mudança do índice de refração do meio, causam dificuldades na aplicação. O empenamento da face pela qual se ilumina e visualiza a peça, bem como a mudança do meio, modulam o padrão de speckle, causando o aparecimento de uma alta densidade de franjas ou perda de correlação. Em alguns casos se têm aplicado métodos de controle/compensação destas franjas [61].

A aplicação do vácuo, quando se inspecionam peças grandes, também se torna problemática. Neste caso, recomenda-se a aplicação do vácuo por partes em toda a estrutura, através da colocação de câmaras compactas somente sobre a região a inspecionar. Esta técnica apresenta inconvenientes quando da aplicação de vácuo em superfícies não planas.

Em relação ao nível de vácuo necessário para produzir bons resultados, as magnitudes de vácuo parcial aplicadas para detecção de defeitos variam muito, de acordo com a estrutura e material da peça a analisar, bem como do tipo do defeito. No entanto, alguns autores indicam que o diferencial de pressão aplicado é relativamente baixo, não havendo a necessidade de aplicação de alto vácuo. Nos trabalhos encontrados utilizaram-se vácuos parciais da ordem de 52600 Pa (0,526 bar) para aplicações em materiais conjugados (Plástico reforçado com fibras). Para a detecção de bolhas em pneus automotivos e de aeronaves utiliza-se pressão absoluta da ordem de 93200 Pa (0,932 bar) [36, 56, 57].

### 3 - Carregamento térmico:

O carregamento térmico é o meio mais prático de aplicar um esforço físico sobre um corpo para fins de inspeção não-destrutiva com interferometria. O método não exige aparatos grandes nem sofisticados, é seguro e rápido de aplicar, além de não haver contato entre carregador e peça, minimizando até certo ponto o problema de deslocamento de corpo rígido durante a aplicação. Suas principais dificuldades se dão no controle do carregamento e na grande influência que o ambiente provoca, com a variação da temperatura do meio, dificultando bastante a quantificação do defeito. Normalmente as técnicas utilizando carregamentos térmicos são puramente qualitativas.

O método consiste basicamente em aquecer ou resfriar o corpo, entre as duas exposições, através de fontes radiantes, jatos de ar quente, evaporação de fluidos voláteis colocados na superfície, etc., provocando um estado de deformação (contração ou dilatação), por meio do qual defeitos superficiais ou internos possam ser localizados.

É particularmente adequado para casos em que o defeito provoque o aparecimento de um gradiente térmico localizado ou que a parte defeituosa, mesmo quando homogeneamente aquecida, tenha uma condição de deslocamento diferente das demais. Nestes dois casos haverá deslocamentos irregulares na superfície, denunciados por franjas de interferência igualmente distorcidas.

Esta técnica tem sido usada quase que exclusivamente na localização de delaminações e vazios em elementos laminados compostos por mais de um material, e na detecção de falhas em revestimento de superfície, havendo alguma aplicação, também, na detecção de trincas e fragilidades estruturais [38, 45, 59, 62].

Na localização de delaminações em materiais laminados ou colados, sua boa utilização se dá principalmente quando houver uma significativa diferença de coeficiente de expansão térmica entre os materiais. Neste caso, quando aquecidos, forma-se uma estrutura semelhante a um bimetalico, com um material restringindo a deformação térmica de um outro, com maior coeficiente de dilatação térmica. Em uma área descolada a região do defeito terá uma liberdade de deslocamento bem maior que o restante, induzindo o aparecimento de tensões térmicas localizadas.

Este efeito será tão mais favorecido quanto maior a diferença de coeficientes de expansão térmica entre os materiais. Considerando um caso extremo, no qual **borracha esteja colada a uma superfície metálica** [61], pelo fato do coeficiente de dilatação térmica da borracha ser normalmente uma ordem de grandeza superior à dos metais, resultará em uma diferença de expansão nesta magnitude. Deste modo, uma pequena variação de temperatura na área descolada ou em toda a estrutura será suficiente para causar deformações irregulares no material.

Além deste "efeito bimetalico", um outro mecanismo pode explicar a aplicação de carregamento térmico em detecção de defeitos. Na hipótese de haver um descolamento entre materiais idênticos, a distorção no deslocamento pode ser causada pela diferença de impedância térmica entre uma área defeituosa e uma perfeita, criando ali uma gradiente térmico localizado e seus conhecidos efeitos. A presença de ar na interface descolada normalmente causa esta alteração na impedância térmica.

A presença de ar no descolamento é um fator de grande importância na aplicação de carregamento térmico, como também o é na aplicação de vácuo. Se as partes descoladas

mantêm contato físico (0,1 a 1nm de cavidade), deverá ser criado um campo de tensões suficientemente grande na interface descolada, de modo a vencer a mínima força necessária para criar um vácuo entre as partes em contato. Isto pode requerer uma temperatura suficientemente grande para ser de aplicação impraticável, dependendo do material. Havendo ar na interface descolada, este expande-se com o aquecimento, contribuindo uma desejável distorção superficial. A existência de pré-tensões na peça é um outro fator que dificultará a localização da falha.

Uma dificuldade na aplicação do carregamento térmico se dá quando são inspecionados laminados que contêm um material viscoelástico como revestimento externo (Epoxi, Náilon, **borracha**, etc.). Pequenas mudanças na temperatura aplicada à superfície viscoelástica levarão a uma condição de escoamento, na qual as "montanhas e vales" microscópicos que formam a superfície, mudam opticamente. O resultado leva facilmente a uma perda de correlação dos speckle. Existem técnicas para minimizar este fenômeno, como carregar a peça pelo lado do metal, observando pelo lado da borracha mas, em geral, outras técnicas de carregamento (vibração e vácuo) têm se mostrado mais eficientes [61].

Materiais metálicos laminados, unidos por ligação metálica (difusão metálica, brasagem, etc.), não se adequam bem para carregamentos térmicos, pela dificuldade em se manter um gradiente térmico ao longo das camadas, além da proximidade entre os coeficientes de expansão térmica dos metais, o que minimiza bastante aquele efeito bimetalico citado anteriormente. Em metais unidos por colagem com resinas ou outras colas não-metálicas, torna-se possível a localização de delaminações/descolamentos através de carregamentos térmicos.

Outros exemplos de aplicação de carregamento térmico para detecção de defeitos podem ser vistos em [35, 55, 63 - 70].

#### 4 - Vibrações:

A capacidade que certas técnicas interferométricas de NDT, entre elas a HE, têm em registrar a vibração sofrida por um corpo na forma de franjas de interferência tem permitido não só a análise destas vibrações em um aspecto quantitativo, mas também o uso deste recurso para detecção de defeitos.

Assim, excitação por vibrações tem sido um meio efetivo de revelar falhas em certos casos. Em teste, a estrutura pode ser excitada por uma vibração global induzida por um campo acústico ou localmente, por um atuador tal como um cristal piezoelétrico em contato com o objeto, induzindo uma onda a ser propagada ao longo da estrutura. A área defeituosa terá uma frequência natural de vibração diferente do restante do corpo, o que será denunciado ao se fazer a excitação variar ao longo de uma faixa de frequências que cause a ressonância da área falha, isoladamente. Em certos casos, simplesmente ao se colocar a estrutura para vibrar a uma frequência definida será possível diferenciar as respostas de áreas boas e defeituosas, não sendo necessário efetuar varredura em frequência.

A excitação de estruturas com vibrações é um método dinâmico de carregamento, e assim se fazem necessários dispositivos para aplicar o carregamento, como excitador acústico ou atuador piezoelétrico, osciladores, amplificadores, aumentando a infra-estrutura básica para realização dos ensaios, constituindo um fator que diminui a praticidade de utilização desta técnica.

A aplicação de vibrações como carregamento para NDT com interferometria tem se dado principalmente na inspeção de trincas e delaminações. Quanto à aplicação deste carregamento para detecção de delaminações em materiais compostos, [61] cita que, além de envolver uma estrutura maior em termos de equipamentos, este método é de implementação mais lenta e freqüentemente dá resultados menos satisfatórios do que outras técnicas, como

aquecimento e vácuo. Assim, recomenda-se a tentativa de outras alternativas mais práticas antes de partir direto para este tipo de carregamento, devendo ser testado na hipótese de resultados não satisfatórios com outros tipos de carregamento.

Ainda em relação a delaminações, análises realizadas sobre o modelo de uma placa circular presa ao longo das bordas, que é como normalmente são modelados descolamentos entre camadas, indicam que a frequência natural da área descolada depende das propriedades do material e é inversamente proporcional à razão entre o diâmetro e a profundidade do descolamento. Se a razão diminui, a frequência natural de vibração do defeito aumenta, sendo necessários excitadores bem mais poderosos, ao mesmo tempo em que as amplitudes de vibração ficam cada vez menores, podendo ficar abaixo do limite de resolução da técnica [36, 61].

## 5 - Carga de impacto:

Quando um impacto é aplicado a um objeto, ondas de choque transversais originadas no local da carga irão se propagar a partir daí com uma velocidade que é relacionada com a estrutura do material. Se uma falha de dimensão suficientemente grande estiver presente no objeto, ela irá criar uma perturbação local à propagação desta onda.

Se um sistema interferométrico é capaz de registrar as amplitudes destas ondas na forma de padrões de franjas, indicará esta perturbação local como uma anomalia no padrão de franjas, denunciando a presença do defeito.

Alguns autores colocam este tipo de carregamento no mesmo grupo dos carregamentos com vibrações, pelas respostas semelhantes oferecidas pelo corpo a estes dois carregamentos. Devido aos mesmos requisitos impostos pelo carregamento com vibração, sua utilização é restrita. Como a vibração, suas aplicações têm se dado principalmente na detecção de trincas e delaminações em materiais compostos [38][71].



### **3.5 - PROPOSTA DE METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE NDT COM HE:**

Embora o desenvolvimento de uma técnica apresente características bem particulares de caso a caso, os procedimentos podem ser sistematizados de modo a se conseguir uma maior eficiência e rapidez no seu desenvolvimento. Com base nas experiências anteriormente relatadas, procurou-se estabelecer esta sistemática de ordenamento das atividades, seguida neste trabalho, e que poderá ser útil para futuros usuários.

Para fins de seqüenciamento, o desenvolvimento de uma técnica de detecção de defeitos com HE foi dividido em três macro-atividades, estando o fluxograma de todo o processo na figura 3.22.

#### **1 - ANÁLISE PRELIMINAR DO PROBLEMA**

Consta de avaliações teóricas elementares visando verificar precocemente a possibilidade mínima de aplicação da técnica ao problema sem, no entanto, aprofundar-se no estudo de suas variantes. Caso positivo, efetuam-se testes primários procurando observar o comportamento da peça a partir das franjas obtidas, avaliando-se também se a qualidade e quantidade destas franjas permitem tal análise, definindo-se pela continuação ou não dos trabalhos.

É fundamentalmente uma etapa de "filtragem", procurando-se evitar investir em um problema claramente inviável, embora não se possa de maneira alguma garantir o sucesso da técnica somente com esta análise, sem uma verificação experimental.

## 2 - ATIVIDADES DE CARÁTER TEÓRICO

Após verificada a viabilidade mínima de aplicação da técnica ao caso e tendo-se decidido investir no problema, parte-se para a etapa de aprofundamento teórico, buscando-se conhecer com maior ênfase as principais propriedades dos elementos envolvidos no problema: o defeito, a peça e o material que a constitui.

A partir de tais informações, devem-se levantar alternativas de técnicas de carregamento físicos que possam identificar o defeito na peça, analisando-se sua adequação ao caso e praticidade de implementação. Para cada alternativa de carregamento deve-se escolher direções de sensibilidade compatíveis com o tipo de resposta oferecido pela peça ao esforço.

Por ser uma etapa de investigação e também de idealização de hipóteses, complementarmente a um bom estudo bibliográfico é bastante útil obter-se informações e opiniões de terceiros, por contato individual ou por alguma reunião de geração de idéias ("brainstorming"). Ao fim desta etapa deve resultar uma lista com alternativas de combinação carregamento x sensibilidade, aplicáveis ao problema.

De posse desta lista será útil a realização de análises de viabilidade sobre as alternativas, de modo a identificar as mais promissoras, que seriam então verificadas experimentalmente. Neste trabalho, esta análise foi feita julgando-se todas as combinações de carregamento x sensibilidade com base em critérios pré-estabelecidos.

A seguir são descritas com maiores detalhes as atividades de caráter teórico, constantes desta etapa.

**a) ESTUDO DO DEFEITO, MATERIAL, PEÇA:**

Como ponto de partida para o desenvolvimento propriamente dito da técnica, devem ser aqui estudados aspectos básicos do caso, buscando-se levantar suas principais características, a saber:

- Tipo de defeito, forma de apresentação, mecanismo de formação, dimensões e localização na peça, frequência de ocorrência, etc..
- Tipo de material, estrutura interna, propriedades físicas químicas, elétricas, térmicas e mecânicas, comportamento elástico frente a carregamentos, etc..
- Tipo de peça, forma, dimensões, peso, ambiente de funcionamento, função executada, solicitações sofridas, confiabilidade requerida, etc..

**b) TIPO DE EFEITO NA SUPERFÍCIE QUE O DEFEITO PODE CAUSAR:**

A partir das informações iniciais, estudar alternativas de como o defeito poderia se manifestar superficialmente, possibilitando sua identificação. Defeitos internos teriam de "vir para fora", trincas teriam de ser aumentadas, etc..

**c) ESTADO DE TENSÕES NECESSÁRIO:**

O passo seguinte seria, a partir das alternativas visualizadas na etapa anterior, estabelecer qualitativa ou quantitativamente para cada uma delas, o(s) estado(s) de tensões que teria(m) de ser provocado(s) no corpo para proporcionar o aparecimento daquelas distorções superficiais.

**d) FORMAS DE CARREGAMENTO:**

Nesta etapa devem-se enumerar alternativas práticas de carregar o corpo para levá-lo àqueles estados de tensões anteriormente listados, teoricamente adequados para a detecção do defeito.

**e) DIREÇÃO DE SENSIBILIDADE:**

Para cada alternativa de carregamento idealizada, deve-se conhecer as prováveis respostas oferecidas pelo corpo e, principalmente, pela região defeituosa, de modo que se possa identificar as direções preferenciais em que estas ocorrem. De posse destas informações, podem-se estabelecer as montagens ópticas mais adequadas, assegurando boa sensibilidade para a observação destas respostas.

**3 - ATIVIDADES DE CARÁTER EXPERIMENTAL**

Como citado, ao fim da análise de viabilidade resultará uma lista de combinações carregamento x sensibilidade a serem verificadas experimentalmente. Nesta etapa serão testadas as alternativas que tenham se mostrado mais promissoras de aplicação. As atividades desta etapa constarão de todas as tarefas relacionando a preparação e execução dos experimentos.

A ordem de preparação e execução dos experimentos deve ser estabelecida após serem considerados aspectos de adequação e praticidade de cada alternativa, relativamente umas

às outras. Neste ponto um aspecto deve ser observado: a técnica pode ser desenvolvida testando-se todas as alternativas e dentre estas ser escolhida a mais adequada em função dos resultados obtidos ou então a série de ensaios poderá ser interrompida em caso de ocorrência de um resultado satisfatório. A decisão vai depender de muitos fatores, destacando-se o tempo e as condições disponíveis para a experimentação. Em qualquer dos casos deve ser sempre feita a ponderação entre praticidade da técnica e resultados obtidos, para cada opção testada. Uma opção "A" poderá fornecer resultados melhor que outra "B" mas ser de difícil aplicação, podendo-se escolher esta última caso apresente resultados satisfatórios.

Para melhor entendimento, subdividiu-se esta macro-atividade em três sub-tarefas:

#### **a) PREPARAÇÃO DOS EXPERIMENTOS:**

Consta de todas as atividades necessárias para formar a infra-estrutura de experimentação, como: projeto, fabricação e testes de dispositivos para aplicação de carregamentos, obtenção de corpos de prova padronizados e aparatos para as montagens ópticas necessárias para cada hipótese a testar. O planejamento de cada experimento também faz parte desta etapa.

Com relação aos corpos de prova, é de fundamental importância a obtenção de corpos padronizados de mesmas características construtivas e contendo, alguns deles, defeitos simulados e conhecidos em tamanho e localização, semelhantes ao que se quer detectar. Sobre eles toda a técnica de inspeção será desenvolvida e a eles todos os demais dispositivos devem se adaptar.

## **b) REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS:**

Compreende a experimentação propriamente dita: realização dos ensaios planejados e preparados na etapa anterior, juntamente com a observação dos resultados surgidos nos testes. Estes resultados servirão para verificar a validade ou não da tentativa e, caso positivo, caracterizar a resposta sistemática que peças perfeitas e defeituosas oferecem ao carregamento aplicado.

Dependendo da forma como o defeito se manifeste, a qualificação será comparativa ou indicativa, havendo ou não necessidade de caracterizar uma resposta padrão de uma peça perfeita para efeitos de comparação com outras a testar.

Em caso da obtenção de resultados não satisfatórios ou quando todas as hipóteses devam ser verificadas, as alternativas carregamento x sensibilidade deverão se suceder até que seja formada uma base de conhecimento suficiente para a tomada de decisão final.

## **c) DECISÃO E PADRONIZAÇÃO DA TÉCNICA:**

Última etapa da parte experimental, compreende as atividades relativas às comparações entre os diversos resultados obtidos buscando-se identificar, dentre estes, aqueles considerados satisfatórios (se os houver) em termos de repetibilidade e facilidade de identificação do defeito. Realizado isto, e considerando-se aspectos de praticidade de aplicação destas alternativas, deve-se chegar a uma decisão final acerca do caso: escolha de alguma alternativa ou conclusão pela não adequação da HE para analisar este tipo de problema.

Se verificada a viabilidade de alguma alternativa, as atividades seguintes devem ser realizadas na direção de padronizar a técnica, com a especificação e documentação das condições e dispositivos com os quais os testes foram realizados. Aprimoramentos que se possam fazer devem ser feitos antes da padronização definitiva da técnica.

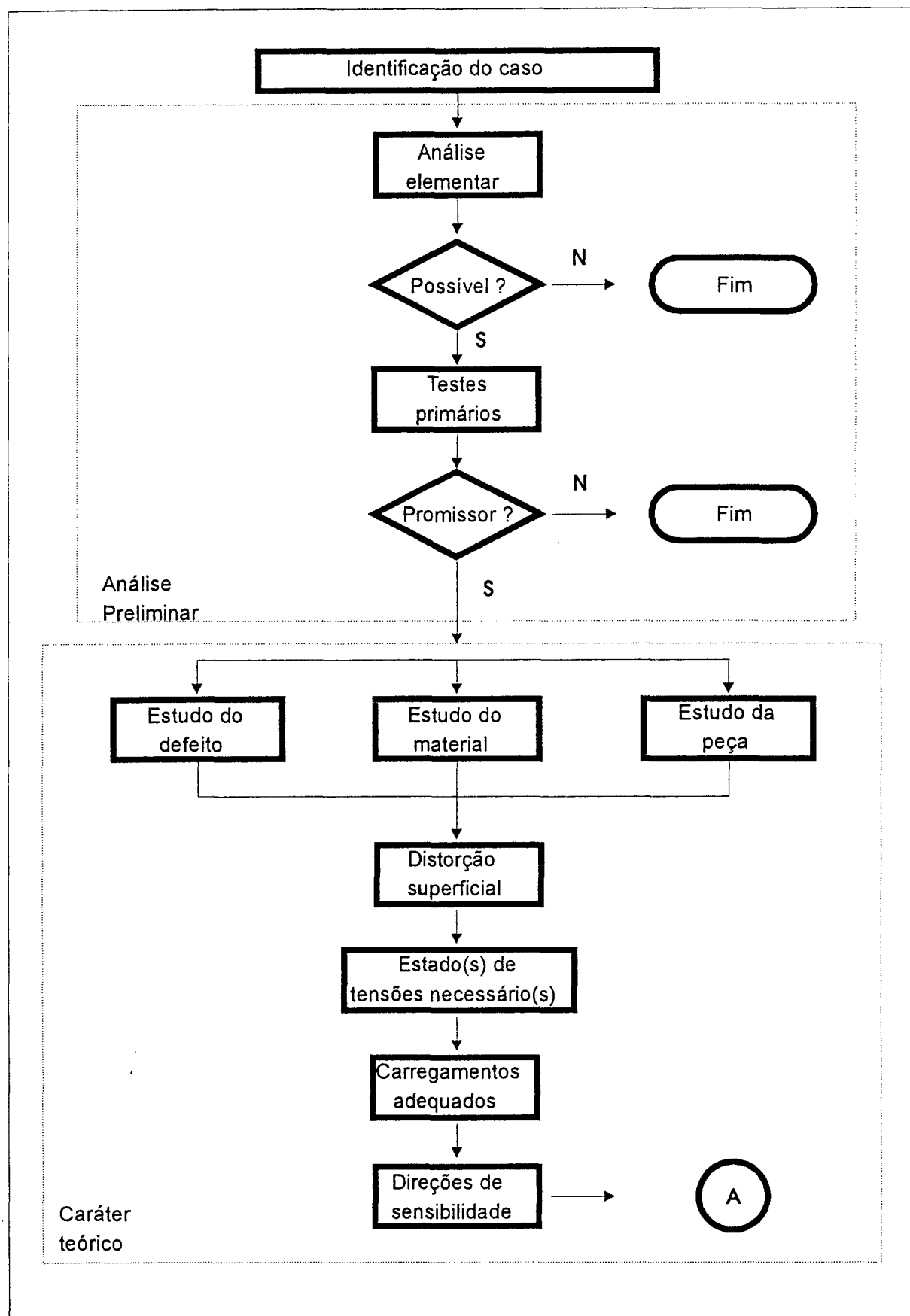


Figura 3.22 - Fluxograma do processo de desenvolvimento de NDT com HE

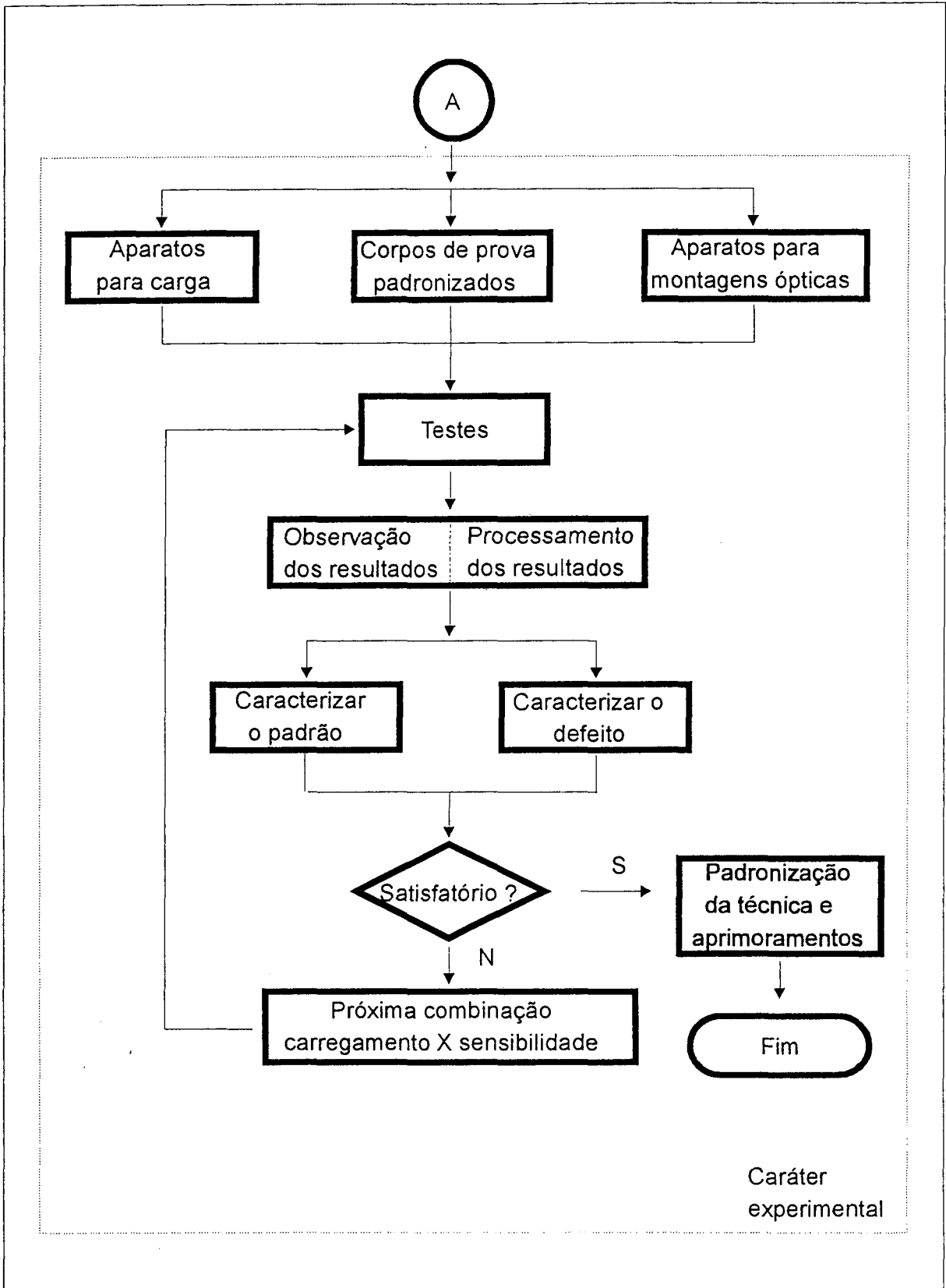


Figura 3.22 - continuação



#### 4. CILINDROS METÁLICOS REVESTIDOS COM BORRACHA

A borracha faz parte de um grupo de produtos industriais básicos, que inclui também metais, fibras, concreto, madeira, plástico, vidro, etc., matérias-prima das quais todos os produtos dependem para sua manufatura. A maior parte das borrachas produzidas, naturais ou sintéticas, é usada na fabricação de pneumáticos para transporte rodoviário. O restante da produção mundial destina-se à manufatura de extensa variedade de produtos industriais e de consumo final, variando em tamanho e em elaboração técnica.

Elasticidade e resiliência são as propriedades que mais distinguem as borrachas dos demais produtos. No entanto, outras propriedades também se sobressaem como impermeabilidade, resistência à abrasão e à corrosão causada pela maioria dos produtos químicos.

Em muitas de suas aplicações modernas, as borrachas são reforçadas com outros materiais como, náilon, poliéster e fibra de vidro, dando como resultado um material composto que proporciona uma combinação de resistência e flexibilidade aos produtos com eles fabricados. A utilização de compostos borracha-metal tornou possível combinar a resiliência e elasticidade da borracha com a resistência e rigidez do aço em diversos produtos industriais como laminadores, amortecedores, pneus, etc..

Ao lado das vantagens que estas combinações proporcionaram, foi necessário aprimorar os processos de fabricação no sentido de tornar os produtos confiáveis, tornando os procedimentos mais complexos e caros, demandando uma inspeção mais criteriosa.

Neste capítulo será feita uma abordagem abrangente sobre a borracha, desde aspectos estruturais, caracterização de propriedades mecânicas até os processos de fabricação e suas variantes, enfatizando em sua parte final os cilindros revestidos, utilizados em laminação.

## 4.1 - BORRACHA

Inicialmente de ser esclarecida a nomenclatura adotada a seguir quanto à diferença entre os termos **borracha** e **elastômero de borracha**. O elastômero é, na composição da borracha, o elemento básico. Uma massa sobre a qual se realizam processamentos e à qual se adicionam ingredientes de modo a obter-se as propriedades desejadas no produto final, a borracha. Alguns autores [72] utilizam unicamente o termo borracha para identificar estes dois materiais. Neste trabalho será adotada a diferenciação acima descrita.

Os elastômeros são materiais poliméricos e, enquanto polímeros, definem-se quimicamente como grandes moléculas construídas a partir da repetição de unidades químicas pequenas e simples, unidas por ligações covalentes.

Existem diversos tipos de elastômeros, variando quanto à sua estrutura e propriedades embora, possam ser classificados em dois tipos básicos: naturais, obtidos da extração vegetal, e sintéticos, derivados do petróleo e outros minerais. Dependendo da aplicação, propriedades elétricas, ópticas, químicas ou térmicas, com as quais sua estrutura molecular tem direta relação, são otimizadas na fabricação do produto (a borracha). Porém, na maior parte dos casos as propriedades mecânicas estão mais fortemente relacionadas às aplicações e suas condições de uso e fabricação [73].

Existe, essencialmente, um único tipo químico de borracha natural. A variedade de propriedades físicas encontradas nas diferentes borrachas naturais é função do tipo de árvore produtora, da região de origem e do processo de obtenção. Nos elastômeros sintéticos, ao contrário, existem muitos tipos químicos diferentes, cada uma com suas vantagens e desvantagens, faixas específicas de propriedades e áreas de utilização.

Entre todos os tipos de elastômeros disponíveis, natural ou sintéticos, não existe algum que possa ser considerado, em todos os sentidos, melhor do que o outro. Entretanto, a borracha natural permanece ainda como uma das mais versáteis, devido ao conjunto de suas propriedades físicas. Não existe, porém, uma propriedade física isolada, para a qual um melhor desempenho não possa ser obtido pelo uso de algum elastômero sintético. A escolha do elastômero é normalmente feita em função das propriedades essenciais para cada aplicação, além do preço.

#### 4.1.1 - Estrutura Molecular

Como citado anteriormente, os polímeros (elastômeros) são moléculas constituídas de unidades menores e repetitivas. Em alguns casos, a repetição dessas unidades se dá de forma linear, formando cadeias a partir de suas ligações. Em outros casos as cadeias são ramificadas ou interligadas, formando redes tridimensionais. A unidade de repetição de uma cadeia polimérica é equivalente ao monômero, ou matéria básica do qual o polímero é formado.

Sob o ponto de vista molecular, o aspecto central da química de polímeros é a cadeia de átomos ligados por covalência. O protótipo mais simples é a cadeia polimetilênica, formada por C e H (Fig. 4.1):

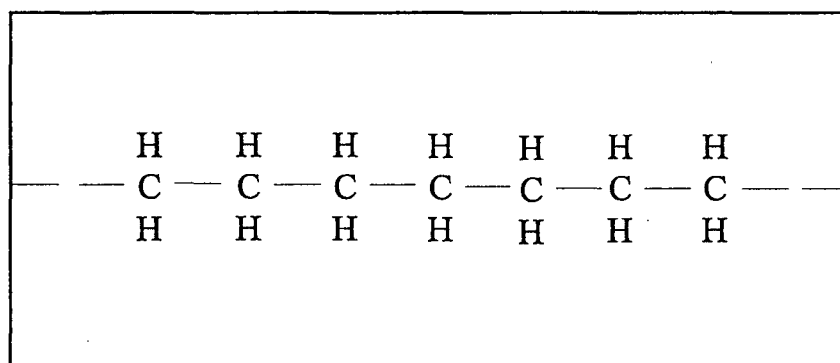


Figura 4.1- Cadeia polimetilênica

Nestas cadeias ocorre o fenômeno de rotação de elementos em torno da ligação C-C, descrito em maiores detalhes em [72] e [74]. Abaixo, na figura 4.2, vê-se a rotação das moléculas de hidrogênio em torno da ligação C-C, no etano ( $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ ).

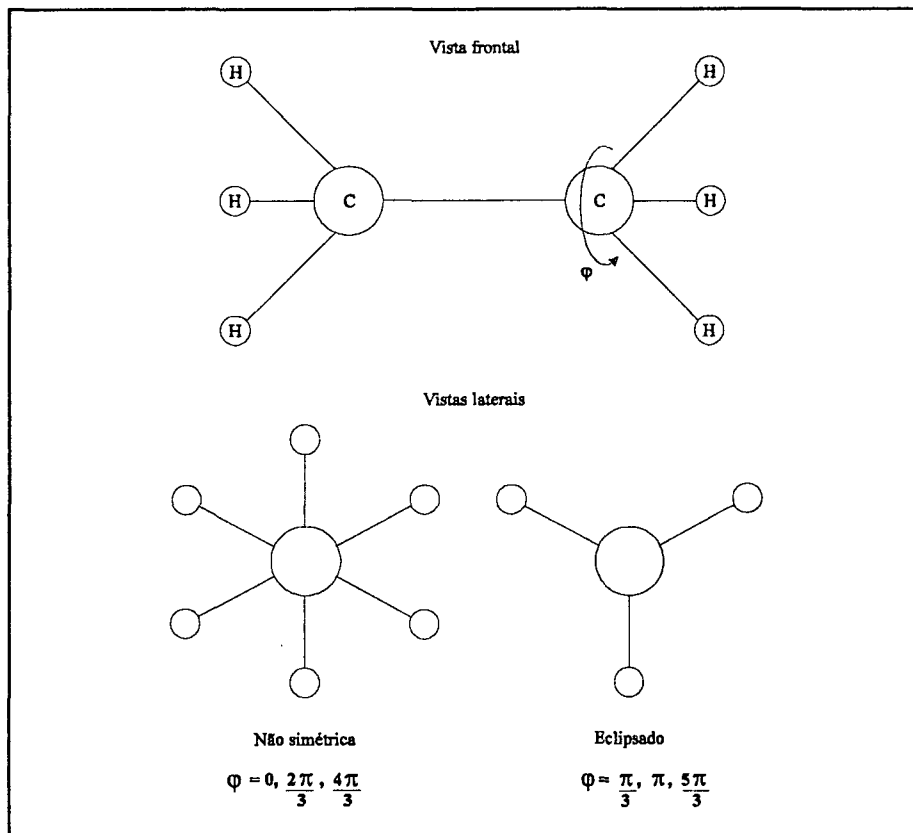


Figura 4.2 - Rotação de grupo  $\text{CH}_3$  em torno das ligações C-C

Esta possibilidade de rotação em torno de cada uma das ligações C-C, permite à cadeia tomar um grande número de conformações diferentes, ou seja, formas tridimensionais diversas, torcidas e enroladas. Além disso, a cadeia está em um estado constante de movimento, enrodilhando-se de uma forma torcida para outra. A velocidade desse enrodilhamento varia bastante com a temperatura e difere, acentuadamente de um polímero a outro.

Devido à possibilidade de rotação em torno da ligação C-C, a molécula da cadeia pode adquirir muitas conformações diferentes, desde um novelo firmemente enrolado até uma forma em zigue-zague, completamente distendida. A maioria das conformações é intermediária a esses dois extremos.

Esta mobilidade intramolecular é uma característica extremamente importante das cadeias de polímeros. É a base da elasticidade da borracha e do comportamento viscoelástico. Ilustrando de modo prático, ao esticarmos uma tira de borracha, a solicitação é transmitida através do retículo do polímero e esforços são, por esse meio, aplicadas aos extremos de uma cadeia linear que liga dois nós do retículo. Ao sofrerem tal esforço, as cadeias interligadas são forçadas a tomar formas distendidas que, a priori, possuem uma menor probabilidade de existência. Termodinamicamente, esta amostra esticada tem uma entropia mais baixa que no estado não deformado à mesma temperatura.

A força restauradora, que leva a um comportamento elástico, relaciona-se ao decréscimo de entropia associado com a distorção de uma cadeia macromolecular de sua configuração mais provável (fig. 4.3) [75].

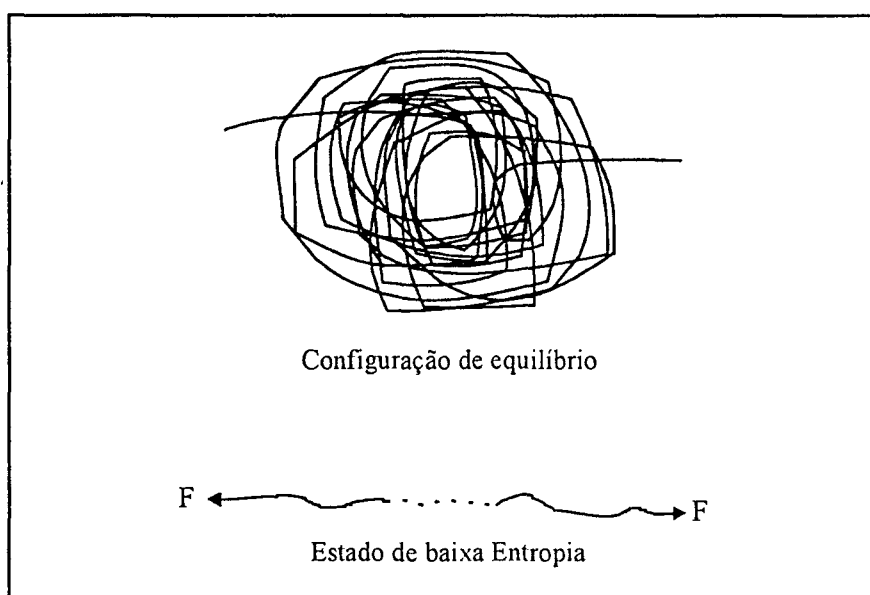


Figura 4.3 - Distorção das cadeias

#### **4.1.2 - Processos de Fabricação da Borracha**

Apesar de possuírem certa elasticidade, as cadeias dos polímeros em seu estado natural, isto é não processado, não estão diretamente ligadas entre si, sendo mantidas em conjunto somente por forças intermoleculares relativamente fracas e pelos efeitos físicos do emaranhado em que as cadeias se encontram. Quando o elastômero é esticado ou deformado, reage de início com considerável elasticidade, mas à medida que se aumenta a força, as cadeias começam a deslizar umas sobre as outras, causando deformações permanentes. Isto ocorre porque o elastômero não processado é parcialmente plástico.

Somente com a realização de processamentos e adição de ingredientes específicos consegue-se obter as propriedades desejadas na borracha. As etapas básicas [73, 76] são descritas resumidamente a seguir.

##### **1 - MASTIGAÇÃO**

Tem por objetivo plastificar o elastômero, por processo mecânico-químico, diminuindo a viscosidade da massa elastomérica e facilitando a incorporação dos ingredientes que compõem a formulação, além de torná-la suficientemente macia e maleável para permitir um melhor processamento.

##### **2 - MISTURA**

Consiste em produzir incorporação completa e dispersão uniforme de todos os ingredientes no elastômero, por meio de misturadores. O tempo e a temperatura da mistura, bem como a ordem de adição dos ingredientes variam de composição para composição.

### 3 - VULCANIZAÇÃO

A vulcanização é um processo irreversível durante o qual o elastômero muda a sua estrutura molecular através de ligações cruzadas entre suas cadeias poliméricas, transformando o que era um emaranhado de cadeias separadas numa rede unificada tridimensional, evitando o deslizamento das cadeias, diminuindo a plasticidade e conferindo à borracha suas propriedades elásticas.

O método de vulcanização basicamente consiste na mistura de enxofre com o elastômero e aplicação de calor e pressão: os átomos de enxofre combinam-se quimicamente com as moléculas do elastômero ao longo das cadeias, formando pontes ou ligações cruzadas entre elas. Além do enxofre, são usados aceleradores e ativadores para reduzir o tempo de vulcanização e melhorar a qualidade dos produtos obtidos.

#### 4.1.3 - Propriedades Físicas

As propriedades físicas das borrachas dependem fundamentalmente de sua estrutura molecular, variando grandemente com o tipo de elastômero utilizado e com a aditivação recebida durante o processo de fabricação. Normalmente estas propriedades são otimizadas em função da aplicação requerida. Em se tratando de um alto polímero, o comportamento e as propriedades físicas da borracha descritos a seguir estarão fundamentadas no estudo de polímeros [74, 75].

##### 4.1.3.1 - Propriedades Mecânicas

Reologia é, por definição, a ciência da deformação e escoamento da matéria. O comportamento reológico de polímeros envolve vários fenômenos completamente diferentes entre si, que podem ser relacionados a diferentes mecanismos a nível molecular.

Tais fenômenos e seus e seus mecanismos essenciais são:

- a) **Escoamento viscoso**, caracterizado pela deformação permanente do material polimérico, associado com o escorregamento irreversível de redes moleculares, umas em relação às outras.
- b) **Elasticidade**, onde a deformação é reversível e a recuperação à retirada do esforço é instantânea. Deformações permanentes são, até certo ponto, impedidos pela estrutura do polímero: uma rede tridimensional difusa.
- c) **Visco-elasticidade**, onde a deformação do polímero é reversível mas dependente do tempo e é associada, como em elasticidade, com a distorção das cadeias poliméricas de suas conformações de equilíbrio através de movimento de segmentos ativos, envolvendo rotações de elementos em torno de ligações químicas.

Os polímeros podem apresentar estes três tipos de comportamento, dependendo de sua estrutura molecular e da temperatura em que se encontram. Abaixo da temperatura de transição vítrea, o seu comportamento é de um sólido **elástico** vítreo. Quando submetido a um pequeno esforço, o material responde com uma pequena deformação elástica.

Nas vizinhanças desta temperatura e acima, podem ocorrer deformações extensivas muito maiores. Mesmo na ausência de um esforço mecânico, as cadeias estão se torcendo de uma configuração a outra e mesmo os seus centros de gravidade estão se movimentando ao acaso. Quando um esforço mecânico é imposto a essa massa de cadeias enroladas, há certa demora para ocorrer uma mudança conformacional sobre o emaranhado, devido ao desenrolar das cadeias. Isto corresponde a um comportamento elástico retardado ou **viscoelástico**. Se por um lado, a condição original é recuperável pela remoção do esforço, por outro lado nem o estiramento, nem a recuperação são instantâneas. Em adição a este comportamento viscoelástico, a amostra pode apresentar um **escoamento viscoso** lento e irreversível, se as cadeias completas do polímero forem lentamente deslocadas relativamente às suas vizinhanças.



Esta tripla resposta é representada esquematicamente na figura 4.4 por um modelo mecânico tipo mola e amortecedor representando, respectivamente, comportamento elástico ideal e escoamento viscoso do polímero. As combinações destes dois elementos em série (elemento de Maxwell) e em paralelo (elemento de Voigt) são utilizadas para representar comportamentos viscoelásticos. Dependendo da estrutura molecular e do nível de esforço, o polímero não apresenta escoamento irreversível [72].

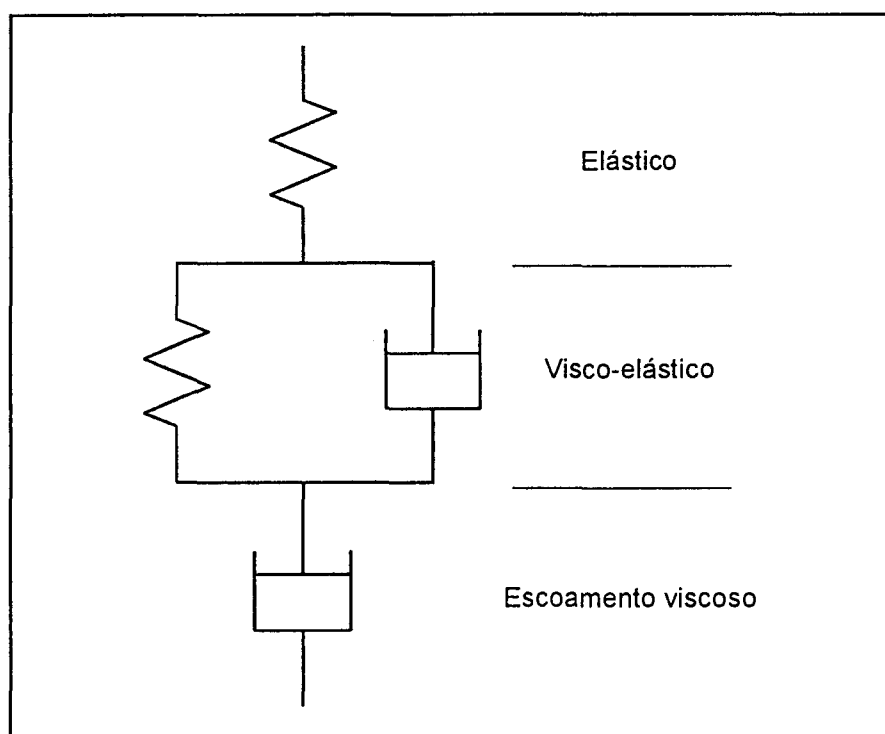


Figura 4.4 - Representação do comportamento mecânico de um polímero

A figura 4.5 mostra como este modelo mecânico pode ser usado para representar o comportamento de um polímero em fluência. O esforço é aplicado instantaneamente em *a* e mantém-se constante até o instante *c*, quando é retirado. Acompanha-se a deformação no tempo. Os ensaios de fluência e relaxação de tensões são bastante empregados para obter-se experimentalmente o comportamento mecânico de borrachas.

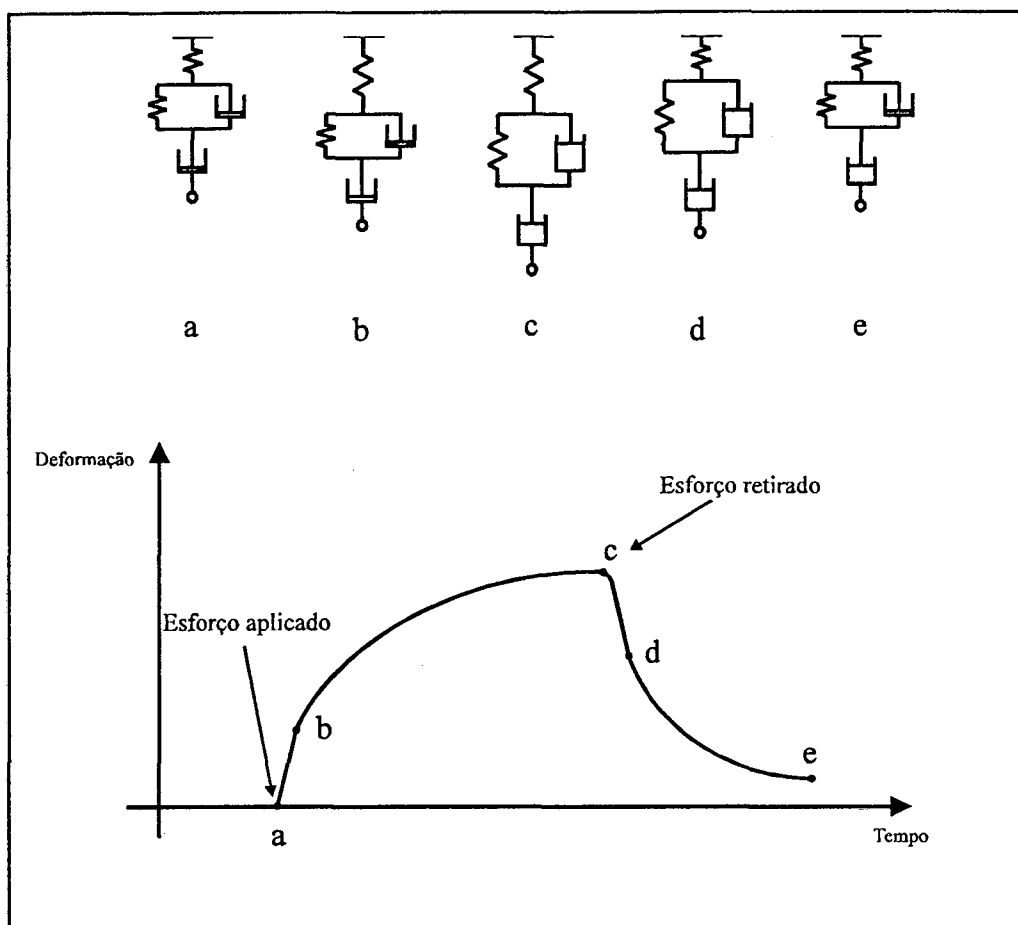


Figura 4.5 - Comportamento de um polímero em fluência, representado através de modelos de Maxwell e Voigt

Como nos demais os polímeros, as propriedades das borrachas variam marcadamente com o tipo e propriedade do material base, que são melhoradas para certas aplicações através de processamentos e adição de agentes reforçadores específicos. A propriedade de resistência à tração das borrachas não é uma característica intrínseca do material, mas depende de sua natureza e do fator tempo nas condições de teste: velocidade de estiramento, temperatura, umidade, geometria do corpo de prova, condições ambientais e mecânicas. A comparação destas variáveis, entre as diferentes composições, somente pode ser feita quando os ensaios forem realizado exatamente nas mesmas condições [77] [78].

A linearidade da curva tensão deformação, outro fator de extrema importância em projeto de elementos mecânicos, possui na borracha desvios marcantes, variando com cada tipo empregado. Alguns tipos de borracha apresentam comportamento aproximadamente linear para uma faixa limitada de tensão. Outros, no entanto, possuem um comportamento não linear acentuado, com o módulo de elasticidade variando muito com a magnitude de deformação aplicada.

Borrachas pouco aditivadas possuem um comportamento relativamente linear. Embora haja uma certa curvatura, o desvio de linearidade não é tão grande. Ao contrário disto, borrachas aditivadas exibem um comportamento altamente não linear. Abaixo (fig. 4.6) vê-se este comportamento em duas borrachas (elastômero natural) com diferentes aditivações, sob esforços de cisalhamento [79].

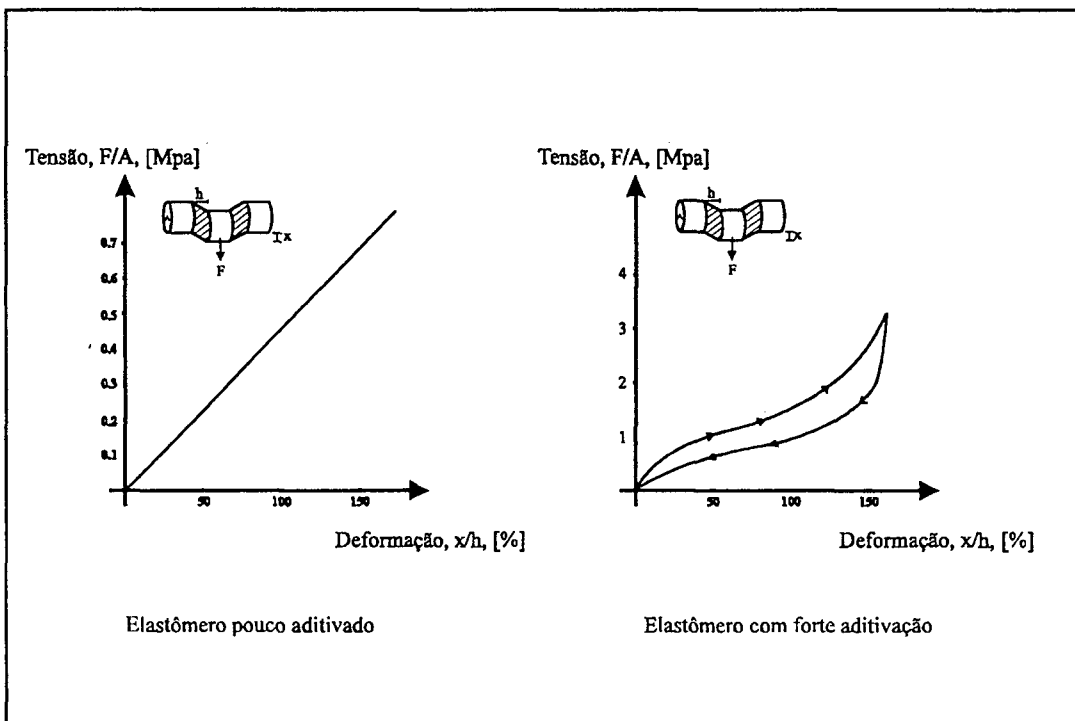


Figura 4.6 - Relação da linearidade da curva tensão-deformação com nível de aditivação nas borrachas

A dureza superficial proporciona um meio indireto e prático de determinação do módulo de elasticidade das borrachas. Embora sempre exista uma parcela de indeterminação nesta análise, é bastante utilizada. A aditivação da borracha com cargas de reforço para aumentar sua dureza aumenta também sua não-linearidade. Como normalmente a dureza é ajustada pela aditivação, quanto mais dura for a borracha maior, seu grau de não-linearidade [79].

Em aplicações dinâmicas, em que a borracha opere a velocidades e cargas variadas, faz-se necessário o conhecimento de outras propriedades para caracterizar o material. Isto se deve ao comportamento viscoelástico, que faz suas propriedades serem muito dependentes do tempo e temperatura. Maiores informações serão vistas no item 4.3.1, quando serão estudados os esforços sofridos pela borracha na laminação.

#### 4.1.2.2 - Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas das borrachas variam, assim como as características mecânicas, de acordo com suas composições. Normalmente apresentam-se como materiais de alta impedância térmica, sendo utilizados como isolantes térmicos em diversas aplicações. Ao lado deste caráter de isolamento a borracha apresenta uma considerável inércia térmica, respondendo de modo lento a alguma alteração de temperatura [73].

Suas propriedades mecânicas variam bastante com a temperatura, havendo um decréscimo acentuado na sua resistência e dureza com o aumento de temperatura. A estabilidade térmica de uma borracha é um parâmetro relacionado à variação de suas propriedades com a variação de temperatura.

Por possuir elevado coeficiente de dilatação térmica, a borracha apresenta uma alta instabilidade dimensional com a temperatura. Na tabela 4.1, encontram-se valores de coeficiente de dilatação linear de alguns tipos de borrachas (natural e sintética), ao lado dos valores deste coeficiente para o Alumínio e Aço para fins de comparação. Destaca-se a grande diferença entre os valores para estes materiais e também a variação do coeficiente de dilatação para diferentes tipos de borracha.

	MATERIAL	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR ( $\mu\text{m/m K}$ )
BORRACHAS	Borracha Natural	150
	Borracha Butílica	150
	Policloropreno	137
	Borracha nitrílica	112
	Borracha fluorada	162
	Borracha siloxânica	185
METAIS	Aço carbono	12
	Aço inoxidável	17
	Alumínio	23

Tabela 4.1 - Coeficiente de dilatação térmica de materiais

As borrachas são limitadas quanto à temperatura de trabalho. Embora existam compostos elastoméricos especialmente preparados para aplicações a temperaturas fora de sua faixa típica (-20 a 80°C) as borrachas comuns sofrem degradação quando operam a temperaturas baixas (cristalização) ou elevadas (envelhecimento, degradação de camadas superficiais, escoamento).

## 4.2 - REVESTIMENTO DE CILINDROS

Como já citado, é crescente a utilização de compostos formados com borracha e outros materiais, combinando propriedades e aumentando sua aplicabilidade. Esta prática tem sido motivada principalmente pelas seguintes razões [80]:

### 1) Proteção superficial contra ataque de agentes contaminantes e degradantes

Em diversas aplicações, a superfície do material base deve ser protegida contra a ação de contaminantes químicos, corrosão e mesmo de desgaste superficial. A aplicação de revestimentos de borracha tem levado a resultados bastante satisfatórios neste casos. São exemplos de aplicações, o revestimento de tanques de substâncias corrosivas, estruturas metálicas submersas, proteção de bombas e turbinas contra a ação de cavitação, etc..

### 2) Combinação de propriedades mecânicas

O aproveitamento da elasticidade apresentada pela borracha, combinada com certas propriedades mecânicas de outros materiais, tem sido de interesse para diversas aplicações na engenharia. A capacidade de deformação elástica da borracha, adaptando-se a diferentes formas, combinada com a resistência e rigidez do aço, tem sido explorada em diversos produtos industriais como em amortecedores, pneus, cilindros para impressão, laminação e transporte em processos industriais, revestimentos internos de bombas (estanqueidade), etc..

Devido à diversidade de aplicações destas peças, para diferentes temperatura e condições químicas, velocidade e carga, os revestimentos variam grandemente em composição e dureza, adequando-se à aplicação. Uma característica extremamente desejável na aplicação combinada destes materiais para revestimento de cilindros de laminação, e que torna o processo de fabricação mais complexo e demorado, é que exista uma adesão satisfatória entre estes materiais. Diversas variáveis interagem no processo, de modo que mais parâmetros têm que ser bem especificados e controlados para um resultado satisfatório em termos de confiabilidade do produto.

#### 4.2.1 - Processo de fabricação

A produção de cilindros metálicos revestidos de borracha normalmente envolve os seguintes passos, resumidamente descritos [78]:

##### a) Preparação da superfície metálica

A superfície sobre a qual a borracha será colocada deve estar completamente limpa antes da aplicação do adesivo. Sujeiras e impurezas como óleos, graxas, ferrugem, oxidações e escamas são eliminadas através de limpeza química e/ou mecânica.

##### b) Aplicação de adesivo

Como principal agente de coesão da borracha com metal, o adesivo deve ser aplicado após a limpeza da superfície e de modo controlado, obedecendo-se os procedimentos recomendados pelo fabricante: modo de aplicação (pincel, spray, ...), espessura de camada e diluição do adesivo, além das condições de secagem (tempo e ambiente).

##### c) Colocação da borracha

Compreende a aplicação da borracha ainda não vulcanizada sobre o cilindro metálico com adesivo. O modo pelo qual esta operação é realizada é descrito em maiores detalhes por ser um aspecto importante para este trabalho.

A borracha é aplicada através de um torno no qual o carro porta-ferramenta é substituído por uma extrusora e um aplicador. A extrusora produz continuamente um perfil de borracha na forma de correia plana, que é então aplicado sobre o metal à medida que o aplicador se desloca paralelamente ao eixo do cilindro em rotação (fig. 4.7). Deste modo, a borracha fica depositada helicoidalmente na superfície do cilindro.

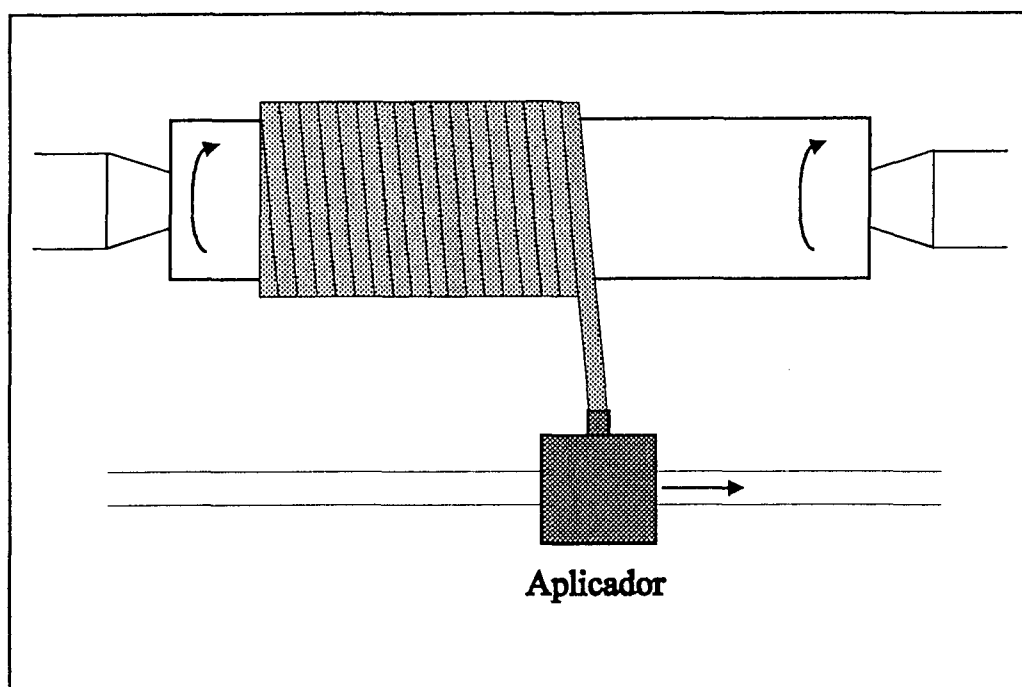


Figura 4.7 - Aplicação da borracha sobre cilindro metálico

#### d) Moldagem

Consiste em envolver-se todo o conjunto cilindro-borracha com uma faixa, normalmente de náilon ou algodão, constituindo ela própria, um molde para a borracha. A faixa é envolvida de modo semelhante à aplicação da borracha, helicoidalmente, sendo tensionada para garantir uma moldagem firme à peça.

#### e) Aquecimento e Cura

Todo o conjunto moldado é levado a uma autoclave onde é aquecido, ocorrendo a vulcanização da borracha ao mesmo tempo em que a mesma se adequa ao molde e adere à superfície do cilindro. Em alguns processos, a cura da borracha é feita em um ambiente com vácuo para ajudar a eliminação de bolhas de ar que possam ter sido introduzidas durante a aplicação da borracha no cilindro.



#### **f) Retificação e polimento**

Após a cura e resfriamento, a faixa é removida e a peça é levada a um torno para operações de retificação. Uma retífica a alta rotação (3600 a 7200 rpm) remove camadas externas da borracha até um diâmetro especificado.

Operações de polimento têm se justificado quando o cilindro é utilizado para impressão de padrões visuais. O polimento é feito com uma correia abrasiva, enquanto o cilindro gira em alta velocidade.

### **4.2.2 - Problemas no processo**

#### **4.2.2.1 - Falhas de adesão metal-borracha**

A adesão de elastômeros a metais é um problema que desperta grande interesse dos fabricantes, não só pelas consequências acarretadas, mas também pela dificuldade de controlá-lo e eliminá-lo, devido às várias possíveis causas de sua ocorrência. Desde a composição dos materiais ao processo de fabricação, são muitas as variáveis que devem ser bem especificadas e controladas [81, 82].

Dentre os vários fatores influentes no processo de adesão metal-borracha alguns têm recebido maior atenção pela influência e frequência com que causam problema na colagem. As falhas de descolamento têm ocorrido por defeitos localizados nos materiais (borracha, adesivo e metal) e, principalmente, por falhas na coesão das interfaces metal-adesivo e adesivo-borracha. Tais falhas estão comumente relacionadas a maus procedimentos de limpeza do metal, aplicação

e cura do adesivo e incorreções na moldagem, ocorrendo com maior frequência em borrachas mais duras. Problemas de descolamento devidos ao mau uso do componente, sob condições acima daquelas especificadas pelo fabricante, mesmo estando perfeitamente fabricado, são também de incidência considerável.

O crescimento do defeito se dá na operação da peça quando, sob carga, a parte descolada tem mais liberdade de deslocamento que as partes coladas, gerando ali um gradiente de deslocamento, traduzindo-se em ponto de concentração de tensões e provocando um aumento na área defeituosa, até inviabilizar a operação do elemento. Bolhas de ar, eventualmente presentes nesta interface, tenderão a se expandir, quando da geração de calor em função dos esforços incidentes na peça, agravando o problema. Na figura 4.8, pode-se ver a consequência de um descolamento ocorrido na interface metal-borracha em um cilindro revestido.

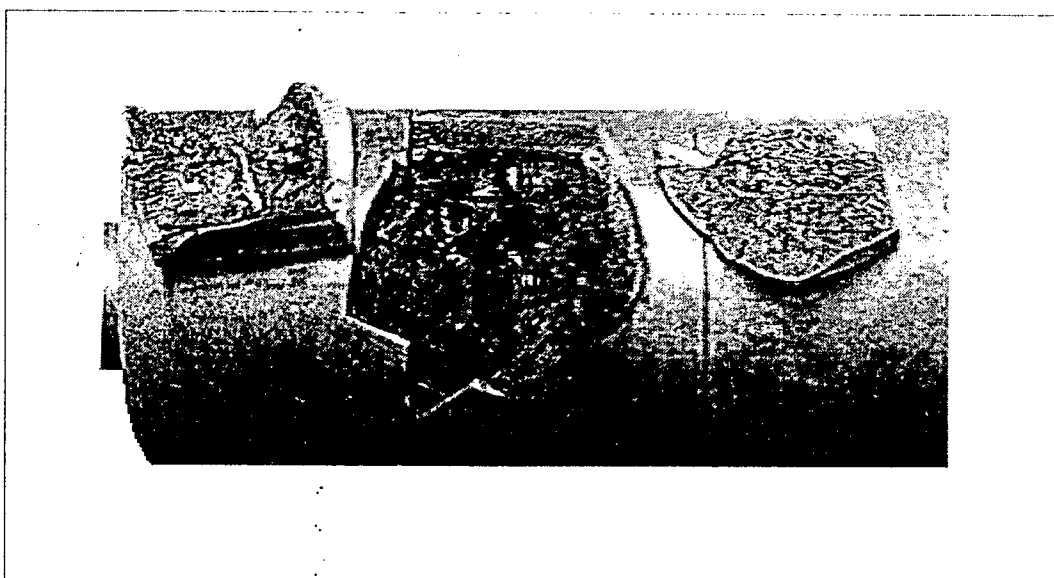


Figura 4.8 - Falha de adesão no revestimento, causando o rompimento da borracha

#### 4.2.2.2 - Falta de homogeneidade na borracha

A presença de inclusões na borracha, devida a procedimentos indevidos durante sua preparação, normalmente causa problemas na utilização dos cilindros, principalmente se esta inclusão for de material metálico. Quando operando em laminação, haverá uma concentração de tensões indesejada na região em torno da inclusão que poderá, dependendo da dureza da borracha e da profundidade da inclusão, até mesmo causar danos no cilindro oposto ou no material sendo laminado. Além disso, se a inclusão possuir um coeficiente de dilatação térmica muito diferente da borracha, como ocorre com os metais, haverá uma dilatação diferencial também danosa para o funcionamento e a vida útil do elemento.

Além da presença de inclusões, as não homogeneidades no produto também dependem do modo com que a aplicação da borracha sobre o cilindro é realizada. Quando a borracha, não vulcanizada, é aplicada helicoidalmente sobre o metal (fig. 4.7) e após isso aquecida e curada, escoa de modo a adquirir uma estrutura uniforme e homogênea ao longo da peça. Devido a alguns fatores, como tipo de borracha, temperatura de vulcanização, ângulo de aplicação da borracha sobre o cilindro (ângulo da hélice), etc., este processo é causa de não-homogeneidades na borracha que em certo grau pode levar a um mau funcionamento da peça, sendo objeto de investigação de especialistas da área [83].

Isto é crítico principalmente em cilindros de impressão, pois eles devem transmitir somente a imagem requerida, sem nenhum padrão representativo do processo de fabricação. Em cilindros de laminação, as não homogeneidades (pontos de densidade variável ao longo da borracha) podem causar secagem irregular de papel e têxteis, quando operados para este fim, além de serem pontos de concentração de tensões.

### 4.2.3 - Técnicas de Inspeção

Os métodos de inspeção utilizados atualmente para detecção de descolamentos em cilindros revestidos consistem basicamente de métodos destrutivos em que, por amostragem, algumas peças são cortadas e verificada sua qualidade, aprovando/reprovando um lote, e também dos testes de resistência, em que a peça é colocada a operar em condições acima das normais, de modo a denunciar precocemente algum defeito incluso no elemento.

A inspeção visual (2.3.1.2) e a inspeção por impacto acústico (2.3.4.2) são as técnicas-não-destrutivas (NDT) mais utilizadas neste contexto, embora bastante limitadas em resolução e confiabilidade.

Em aplicações de risco, como em revestimentos para proteção contra substâncias altamente corrosivas, é inadmissível a existência de falhas que causem o ataque da superfície do substrato. Além dos custos com novas retificações ou reposição de unidades defeituosas, a prevenção contra vazamentos tem que ser garantida por uma inspeção 100%, por motivos óbvios.

A norma estabelece os procedimentos de inspeção para estas estruturas ao longo de todo o processo de fabricação, verificando a qualidade da borracha, das superfícies a serem aderidas e de todo o processo de colagem.

A localização das não-homogeneidades descritas em 4.2.2.2 é feita tanto destrutivamente, cortando-se fatias da borracha e examinando-se a impressão causada por estas em uma superfície plana, como de forma não destrutiva: visualmente, através de impacto acústico ou simplesmente colocando-se o cilindro para trabalhar em sua condição normal e verificando-se alguma anormalidade na impressão ou secagem.

### 4.3 - UTILIZAÇÃO DOS CILINDROS

Os cilindros analisados neste trabalho são utilizados para secagem e transporte de fibras têxteis e papel em seus processos de fabricação, operando sempre em conjunto com outros, normalmente em laminação duo ou trio.

#### 4.3.1 - Dinâmica do processo

O processo de laminação efetuado pelos cilindros revestidos impõe à borracha uma deformação cíclica e localizada de compressão e cisalhamento, iniciada quando duas linhas axiais dos cilindros entram em contato e finalizadas quando essas mesmas linhas se separam, com a rotação dos cilindros. A área de contato formada pela deformação de compressão dos dois cilindros é denominada *nip*, e depende, além da pressão de contato, do módulo dinâmico<sup>1</sup> da borracha [84].

O módulo dinâmico é a propriedade mecânica mais importante dos revestimentos de borracha e mede a resistência à deformação do material sujeito a esforços dinâmicos, sendo afetado pelo tipo de borracha, temperatura, taxa de aplicação de carga e nível de tensão empregado. Seus valores são determinados em laboratório, considerando-se todos estes fatores.

A deformação cíclica sofrida pela borracha no nip gera calor através da histerese apresentada pelo material sob este esforço. Este calor gerado e a temperatura ambiente determinam a temperatura de trabalho dos cilindros de laminação, que em certos casos de serviço severo dos cilindros, deve ser monitorada e controlada através de resfriamento adequado.

---

1

Embora a dureza da borracha seja um parâmetro muito usado em projeto, quando se trata de revestimentos de cilindros de laminação, outras propriedades são também consideradas pelos fabricantes para especificar o material de revestimento. Muitos cilindros operam a altas velocidades e sob cargas pesadas, nas quais propriedades térmicas e dinâmicas das borrachas devam ser conhecidas. O módulo dinâmico e a histerese apresentados pela borracha são os principais parâmetros a serem considerados.

#### 4.3.2 - Condições de operação

A magnitude dos esforços mecânicos e térmicos sofridos pelos cilindros em operação dependem da função que estes exerçam em seus processos de fabricação embora os tipos de esforços suportados sejam idênticos para as três funções básicas normalmente realizadas por estes elementos.

##### a) Transporte de material

Neste caso, os cilindros mantêm entre si uma pressão de contato relativamente baixa, somente suficiente para assegurar o arraste do material ao longo de etapas da produção. A deformação sofrida (nip) é função da dureza da borracha e da pressão de contato, havendo pequena compressão e cisalhamento da borracha na área de contato entre cilindros. Por não sofrerem esforços muito severos, os cilindros fabricados para esta função, normalmente não apresentam grandes problemas.

##### b) Transporte e secagem por compressão dos cilindros

Os esforços sofridos pela borracha neste caso são semelhantes ao anterior, mas bastante diferentes em magnitude. Para promover a secagem dos produtos, utilizam-se pressões de contato bem maiores, causando considerável deformação na região do nip e maior geração de calor na borracha. Dependendo da carga e do calor gerado, poderá haver a necessidade de resfriamento do elemento a ar ou água.

##### c) Transporte e secagem por compressão e cisalhamento

É a condição mais severa de trabalho imposta à borracha em cilindros de laminação. Neste caso, os cilindros giram a velocidades diferentes provocando, além de compressão, o arrasto de uma superfície em relação à outra e esforços de cisalhamento sobre o revestimento. Apesar da pressão de contato e do nip serem geralmente menores que no caso anterior, o atrito entre os cilindros gera uma quantidade de calor superior, necessitando normalmente de refrigeração para evitar o envelhecimento precoce da borracha.

## **5. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ALTERNATIVAS EXPERIMENTAIS**

Seguindo o fluxograma de processo proposto em 3.5, realizados os primeiros contatos com o problema e um estudo em maiores detalhes do material, peça e seus defeitos, partiu-se para o desenvolvimento da técnica propriamente dita, ou seja, de posse das informações obtidas, iniciou-se a investigação das alternativas experimentais que pudessem levar à identificação das falhas. Aqui são descritas as alternativas em si e a avaliação prévia destas.

### **5.1 - IDEALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS**

Como já descrito, o desenvolvimento de Técnicas-Não-Destrutivas para detecção de defeitos com HE reside fundamentalmente em modos adequados de carregar a peça e observar os deslocamentos por meio de montagens ópticas adequadas. Ao se partir para a busca destes meios, foram geradas diversas idéias de diferentes princípios de carregamento que, após análises iniciais, reduziram-se às possíveis de aplicação ao caso em questão. A geração e a análise primária destas opções foram fundamentadas nas informações obtidas no capítulo 3 (Princípios de carregamento) complementadas com os estudos sobre o tipo de material, peça e seus defeitos, capítulo 4.

Apesar desta primeira análise ter reduzido bastante o número de alternativas, estas ainda constituem um número considerável a ser verificado, sendo útil realizar novas análises de viabilidade para reduzi-las a um grupo menor e significativo, sobre o qual, então, os experimentos serão realizados. Todo este processo encontra-se descrito a seguir.





Uma vez definido esse conjunto partiu-se para a análise, fazendo-se todas as combinações possíveis de carregamento/sensibilidade e julgando-as com base em critérios previamente estabelecidos.

### **5.1.2 - Critérios de Avaliação**

No estabelecimento dos critérios, buscou-se cobrir os principais aspectos operacionais desejáveis na utilização de cada combinação carregamento/sensibilidade.

#### **5.1.2.1 - Praticidade:**

Diz respeito à facilidade de implementar na prática a combinação carregamento/sensibilidade. Influenciam neste item a montagem óptica necessária, bem como os equipamentos para aplicação do carregamento, considerando-se a facilidade de operação e a disponibilidade de tais equipamentos. Para este critério, adotou-se o peso 3.

#### **5.1.2.2 - Adequação teórica:**

Considera os possíveis deslocamentos (avaliados teoricamente) que a peça irá sofrer com o carregamento e a adequação das sensibilidades proporcionadas pelas montagens às direções nas quais tais deslocamentos ocorram, determinando se a combinação carregamento/sensibilidade constitui uma boa opção para detectar regiões defeituosas. Peso 5.

#### **5.1.2.3 - Insensibilidade a perturbações:**

Diz respeito a quanto a combinação sensibilidade x carregamento será insensível a perturbações do meio, como vibrações, variações de temperatura e luz ambiente, que causem influências nos resultados a obter. Peso 2.

#### 5.1.2.4 - Repetibilidade:

A combinação deve proporcionar uma boa repetibilidade nos resultados ao longo de diversos ensaios. Entram neste ítem a facilidade de controlar a magnitude do carregamento, sua estabilidade no tempo e sua uniformidade ao longo da superfície da peça. Peso 3.

#### 5.1.3 - Avaliação

De posse das combinações e dos critérios de análise, procede-se a avaliação, atribuindo-se notas e calculando-se os índices resultantes. Para cada critério, utiliza-se os níveis de importância estabelecidos acima e assim cada combinação analisada recebe uma avaliação ponderada. Após isso, são calculadas as médias destes resultados para cada alternativa de carregamento.

As notas, numa escala de 0 a 5, dadas para cada critério em cada combinação foram ordenadas na tabela do modo descrito abaixo.

Praticidade	Adequabilidade teórica
Insensibilidade a perturbações	Repetibilidade
Total ponderado	

A figura 5.2 mostra o quadro avaliativo com as notas, os totais ponderados e as médias para cada opção.

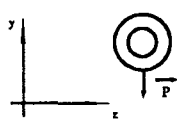
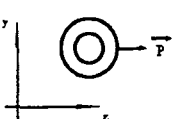
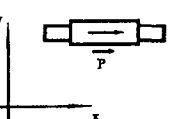
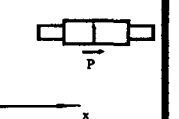




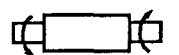
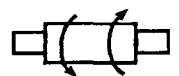
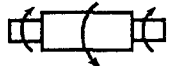


Sensibilidade Carregamento					Média																								
	<table><tr><td>4</td><td>3</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">45</td></tr></table>	4	3	3	4	45		<table><tr><td>5</td><td>1</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">40</td></tr></table>	5	1	4	4	40		<table><tr><td>5</td><td>1</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">40</td></tr></table>	5	1	4	4	40		<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">40</td></tr></table>	3	3	2	4	40		<u>41,25</u>
4	3																												
3	4																												
45																													
5	1																												
4	4																												
40																													
5	1																												
4	4																												
40																													
3	3																												
2	4																												
40																													
	<table><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">42</td></tr></table>	2	4	2	4	42		<table><tr><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">47</td></tr></table>	3	4	3	4	47		<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">44</td></tr></table>	3	3	4	4	44		<table><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">37</td></tr></table>	2	3	2	4	37		<u>42,50</u>
2	4																												
2	4																												
42																													
3	4																												
3	4																												
47																													
3	3																												
4	4																												
44																													
2	3																												
2	4																												
37																													
T ↑	<table><tr><td>4</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">44</td></tr></table>	4	4	3	2	44		<table><tr><td>5</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">47</td></tr></table>	5	4	3	2	47		<table><tr><td>5</td><td>3</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">42</td></tr></table>	5	3	3	2	42		<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">34</td></tr></table>	3	3	2	2	34		<u>41,75</u>
4	4																												
3	2																												
44																													
5	4																												
3	2																												
47																													
5	3																												
3	2																												
42																													
3	3																												
2	2																												
34																													
	<table><tr><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">30</td></tr></table>	1	3	3	2	30		<table><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">33</td></tr></table>	2	3	3	2	33		<table><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">28</td></tr></table>	2	2	3	2	28		<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">23</td></tr></table>	1	2	2	2	23		29,50
1	3																												
3	2																												
30																													
2	3																												
3	2																												
33																													
2	2																												
3	2																												
28																													
1	2																												
2	2																												
23																													
	<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">30</td></tr></table>	1	1	2	3	30		<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">21</td></tr></table>	1	1	2	2	21		<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">21</td></tr></table>	1	1	2	2	21		<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td colspan="2">19</td></tr></table>	1	1	1	2	19		20,50
1	1																												
2	3																												
30																													
1	1																												
2	2																												
21																													
1	1																												
2	2																												
21																													
1	1																												
1	2																												
19																													
	<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">26</td></tr></table>	1	2	2	3	26		<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">26</td></tr></table>	1	2	2	3	26		<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">26</td></tr></table>	1	2	2	3	26		<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>1</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">24</td></tr></table>	1	2	1	3	24		25,50
1	2																												
2	3																												
26																													
1	2																												
2	3																												
26																													
1	2																												
2	3																												
26																													
1	2																												
1	3																												
24																													
	<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">23</td></tr></table>	1	1	3	3	23		<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">23</td></tr></table>	1	1	3	3	23		<table><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">23</td></tr></table>	1	1	3	3	23		<table><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">31</td></tr></table>	1	2	2	3	31		25,00
1	1																												
3	3																												
23																													
1	1																												
3	3																												
23																													
1	1																												
3	3																												
23																													
1	2																												
2	3																												
31																													
	<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">37</td></tr></table>	3	3	2	3	37		<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">37</td></tr></table>	3	3	2	3	37		<table><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">37</td></tr></table>	3	3	2	3	37		<table><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">39</td></tr></table>	2	4	2	3	39		<u>37,50</u>
3	3																												
2	3																												
37																													
3	3																												
2	3																												
37																													
3	3																												
2	3																												
37																													
2	4																												
2	3																												
39																													
	<table><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">31</td></tr></table>	2	3	2	3	31		<table><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">31</td></tr></table>	2	2	3	3	31		<table><tr><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">26</td></tr></table>	2	1	3	3	26		<table><tr><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td colspan="2">29</td></tr></table>	2	2	2	3	29		29,25
2	3																												
2	3																												
31																													
2	2																												
3	3																												
31																													
2	1																												
3	3																												
26																													
2	2																												
2	3																												
29																													
	<table><tr><td>1</td><td>5</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">44</td></tr></table>	1	5	2	4	44		<table><tr><td>1</td><td>5</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">46</td></tr></table>	1	5	3	4	46		<table><tr><td>1</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">41</td></tr></table>	1	4	3	4	41		<table><tr><td>1</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td colspan="2">39</td></tr></table>	1	4	2	4	39		<u>42,50</u>
1	5																												
2	4																												
44																													
1	5																												
3	4																												
46																													
1	4																												
3	4																												
41																													
1	4																												
2	4																												
39																													

Figura 5.2 - Quadro avaliativo das alternativas experimentais

## 5.2 - ALTERNATIVAS MAIS PROMISSORAS

Como se pode observar no quadro avaliativo (Fig. 5.2), a valoração das combinações indicou de forma bem evidente o peso próprio, a força centrífuga, o aquecimento, o cisalhamento da borracha e o vácuo, como alternativas de carregamento mais promissoras ao caso em análise. Neste item se faz uma descrição resumida destes carregamentos, contendo o mecanismo de deformação esperado e os dispositivos necessários para sua implementação.

A ordem em que tais alternativas estão descritas no texto é a mesma empregada para os ensaios realizados e obedeceu ao critério **praticidade**. O carregamento mais simples que atender satisfatoriamente o problema será efetivado como a melhor alternativa, e sobre a qual maiores aprofundamentos serão realizados.

### 5.2.1 - Peso Próprio

O carregamento é efetuado deixando-se a peça em repouso na horizontal, apoiada em seus extremos e com liberdade de rotação. Girando-a rapidamente de 180° e fixando-a nesta posição, acompanha-se a deformação ao longo do tempo (fluência) que o lado, antes superior, sofrerá (Fig. 5.3). Espera-se que a região descolada venha a sofrer maiores deslocamentos do que no restante da peça, possibilitando sua localização. A observação destes deslocamentos será feita no lado inferior da peça, com a sensibilidade vertical e normal à superfície.

Os tempos envolvidos nesta observação serão tais que tornem possível sua utilização em uma inspeção de rotina. Longos tempos, como em ensaio de fluência em materiais por exemplo, inviabilizam a operação mesmo com resultados satisfatórios em termos da detecção das falhas.

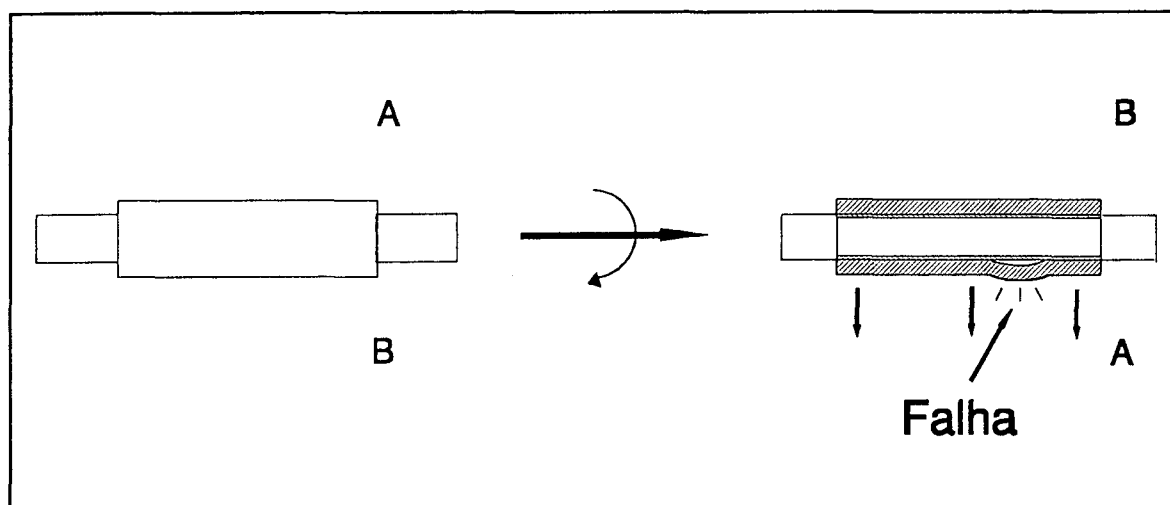


Figura 5.3 - Fluência pelo peso próprio da borracha

Os dispositivos necessários são simplesmente apoios que permitam esta liberdade de movimento, o que demonstra a grande praticidade desta alternativa. A observação da face inferior da peça é implementada com uso de espelho inclinado.

### 5.2.2 - Carregamento Térmico

Neste carregamento procura-se utilizar a grande diferença (10 a 15 vezes) entre os coeficientes de dilatação térmica entre a borracha e o metal para localização das falhas. Quando o calor é aplicado sobre a peça, em regiões de perfeita adesão a borracha é restringida a deslocar-se pelo metal, o que não ocorre em locais em que a borracha, descolada, terá maior liberdade. Nestes locais são causadas distorções superficiais possibilitando a identificação da falha. A representação esquemática do mecanismo de deformação pode ser visto na figura 5.4.

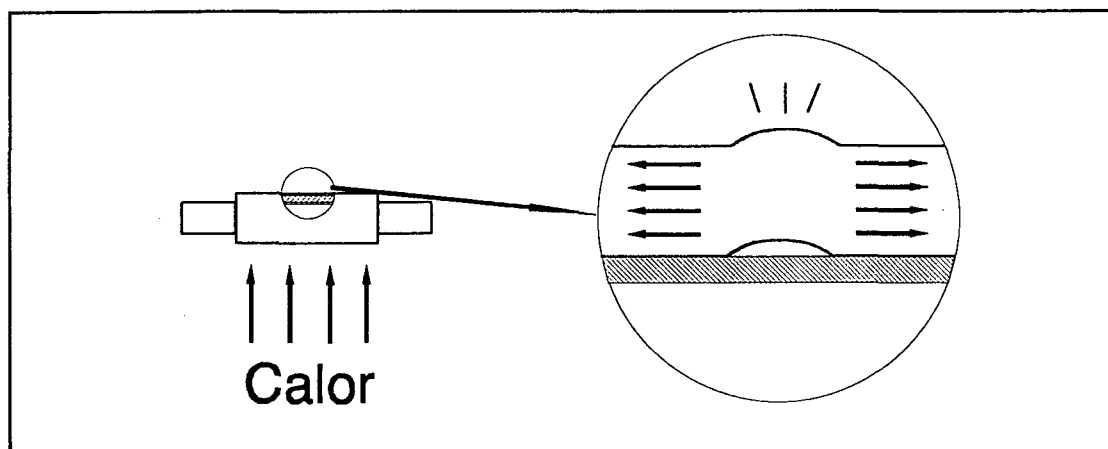


Figura 5.4 - Efeito do aquecimento sobre falhas de adesão

O calor é normalmente aplicado através de aquecedores, utilizando ar quente e resistência elétrica, constituindo uma alternativa também prática de implementação. São utilizadas configurações de simples e dupla iluminação, obtendo-se boas sensibilidades a deslocamentos horizontais, normais e paralelos à superfície, respectivamente.

### 5.2.3 - Cisalhamento

Com este carregamento pretende-se observar o comportamento da peça em uma condição semelhante à sua condição normal de utilização. Ao se comprimir um cilindro contra outro como na laminação (item 4.3) provocam-se deformações cíclicas de compressão e cisalhamento sobre a borracha que agravam o problema dos descolamentos, quando presentes na peça. Isto ocorre basicamente por concentração de tensões em regiões defeituosas e pela expansão de possíveis bolhas de ar com o calor gerado neste esforço. Procuram-se identificar diferenças entre os deslocamentos ocorridos em regiões boas e defeituosas sob este efeito para localizar as falhas (fig. 5.5).

Operacionalmente, os cilindros são submetidos ao esforço e, após colocados em repouso, observa-se o deslocamento superficial resultante, ou seja a fluência. Deve-se ter cuidado com os níveis de esforço aplicados nesta operação para não se "produzir" o defeito. Eles devem estar abaixo do suportado pelos cilindros em sua condição de trabalho.

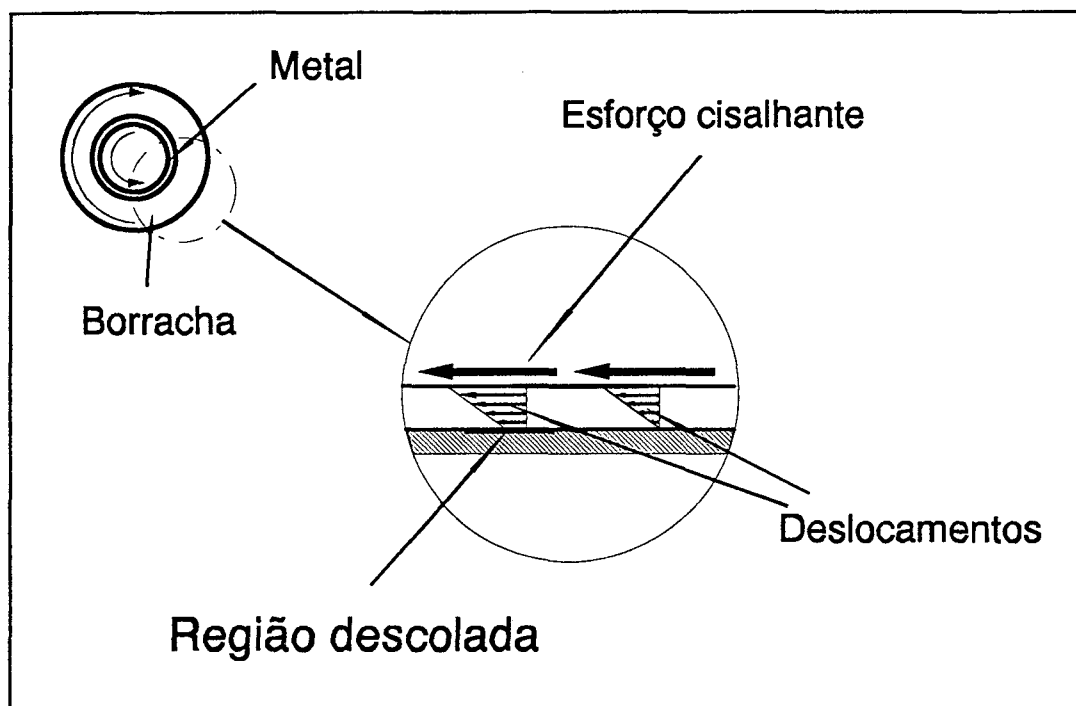


Figura 5.5 - Efeito do cisalhamento sobre deslocamentos em revestimento de borracha

Para implementação desta alternativa de carregamento, são necessários dispositivos apropriados que possibilitem aplicação uniforme do esforço, o que exige boas características construtivas. Estes requisitos já não tornam esta alternativa tão prática quanto as anteriores. A sensibilidade será otimizada para observação de deslocamentos paralelos e normais à superfície da peça.

### 5.2.4 - Força Centrífuga

A força centrífuga causada pela rotação nos cilindros revestidos provoca na peça tensões normais radiais tendendo a separar a borracha do metal. Em regiões com falha de adesão, estes esforços provocam deslocamentos maiores do que em locais sem defeitos, e este efeito diferenciado denuncia a existência de falha (fig 5.6). O ensaio consiste em colocar a peça para girar durante certo tempo e pará-la, observando, a partir daí, o retorno da borracha à sua condição original. A sensibilidade deverá, logicamente, ser otimizada para observação de deslocamentos normais à superfície da peça.

Devido à necessidade de certo nível de rotação, são necessários mancais bem dimensionados e alinhados além do que a peça deve estar bem balanceada para evitar-se vibrações excessivas. Isso faz desta opção uma alternativa menos prática de implementação do que as anteriores.

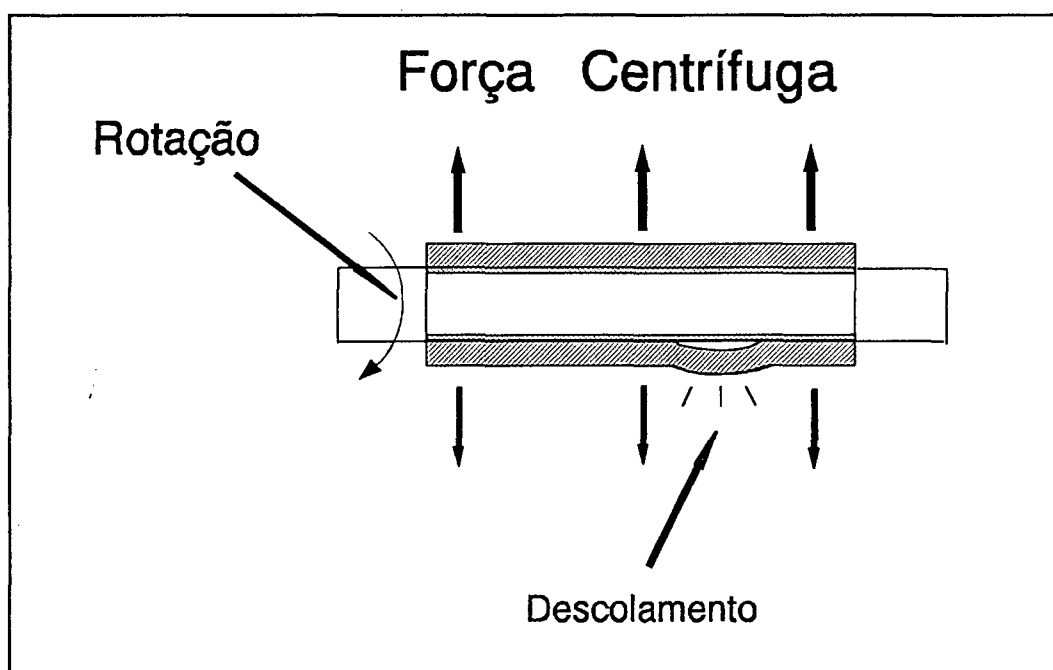


Figura 5.6 - Comportamento de cilindro revestido sob rotação



### 5.2.5 - Vácuo

Com a aplicação do vácuo, procura-se obter um efeito semelhante ao da rotação, ou seja, fazer com que falhas de adesão na interface metal-borracha, sob efeito de tensões radiais e normais à superfície da peça, provoquem deslocamentos irregulares nesta superfície (fig. 5.7).

O ensaio pode ser realizado de dois modos básicos: a) partindo-se da pressão atmosférica, retira-se continuamente ar do ambiente contendo a borracha observando-se os deslocamentos superficiais conseqüentes ou b) observando-se a fluência sofrida pela borracha após submetê-la a uma pressurização/despressurização rápida. A sensibilidade à observação dos deslocamentos deve, como na rotação, ser normal à superfície da peça.

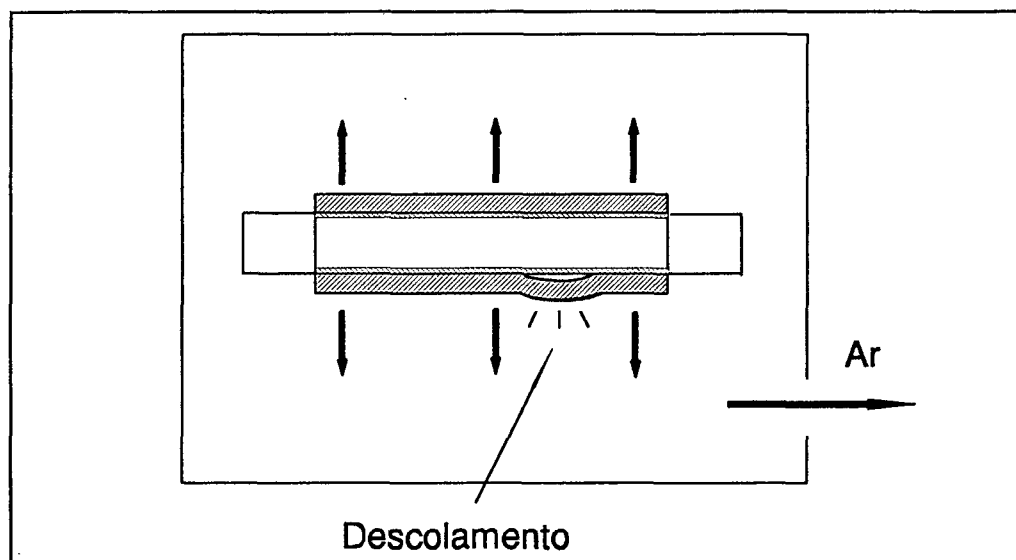


Figura 5.7 - Efeito da aplicação de vácuo sobre falhas de adesão nos cilindros

Devido à necessidade de certos equipamentos, mais especificamente bomba e câmara de vácuo, e dos riscos normalmente envolvidos em operações de pressurização, esta hipótese torna-se menos prática de implementação do que todas as anteriores.

## **6. TESTES DE VIABILIDADE**

Após serem estabelecidas as alternativas de carregamento, cuja viabilidade seria verificada experimentalmente, partiu-se para a aquisição/fabricação das peças a serem testadas e dos dispositivos necessários para a implementação dos ensaios.

Neste capítulo são descritos as especificações dos corpos de prova padronizados, os dispositivos utilizados, as condições sob as quais se realizaram os experimentos e os respectivos resultados, com a discussão sobre a validade de cada alternativa.

### **6.1 - ESPECIFICAÇÃO E FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

No desenvolvimento de uma técnica de NDT, por qualquer método, é de fundamental importância o uso de corpos de prova padronizados para a determinação das condições ótimas de ensaio. Os corpos de prova padrão devem estar rigorosamente dentro das especificações, pois serão tomados como referência e é sobre a diferença de comportamento entre este elemento e as peças a testar que a técnica será desenvolvida. Erros cometidos nesta etapa poderão invalidar por completo o trabalho realizado posteriormente.

Neste trabalho, a especificação dos corpos de prova obtidos junto ao fabricante obedeceu basicamente a dois critérios: a) manter os parâmetros do corpo de prova representativos das características típicas das peças comercializadas pelo fabricante, no que diz respeito a dimensões da peça, tipo de borracha e tipo de falhas, e b) obter um corpo de prova cujas dimensões tornasse possível a experimentação na bancada da Estação Holográfica.

Na fabricação de cilindros revestidos, segundo o processo descrito em 4.2.1, existem três parâmetros básicos para especificação: as dimensões (comprimento e diâmetro) e tipo

do cilindro metálico (maciço ou vazado), o tipo de borracha (dureza) e a espessura do revestimento.

O fabricante produz uma variada linha de cilindros revestidos com borracha, prestando-se a diversas aplicações. Existem atualmente em produção mais de 100 tipos diferentes de borracha utilizadas para revestimento de cilindros com tamanhos também diversificados. Encontram-se desde peças com 10 mm de diâmetro e massa 100 g, até cilindros com 400 mm de diâmetro envolvendo massas da ordem de 1000 kg, revestidos com diferentes tipos de borracha. A relação entre a espessura do revestimento e o diâmetro dos cilindros não possui uma proporção típica, variando conforme a aplicação do cilindro.

Em relação aos problemas de descolamento ocorrentes nestes cilindros, as peças com borrachas de maior dureza estão entre as que mais apresentam a falha de adesão entre metal e borracha. Não existe predominância em relação à forma da falha ou sua localização na peça, provavelmente pelo fato de tais falhas estarem ligadas a causas aleatórias em várias etapas no processo de fabricação. Porém, tem-se observado que descolamentos ocorridos em regiões distantes das extremidades causam maiores problemas para a peça em operação normal no decorrer da sua vida útil. Testes destrutivos têm revelado ao longo do tempo que as dimensões dos defeitos também apresentam grande variação.

A partir de informações fornecidas pelo fabricante em relação a peças que mais freqüentemente apresentam problemas de descolamento, chegou-se ao corpo de prova padronizado visto na figura 6.1. A borracha possui dureza Shore 90 [89], a maior dentre todos os tipos fabricados, e as dimensões foram obtidas a partir de similaridade geométrica com algumas peças que apresentavam problemas, e de forma a se adequar à bancada de experimentação.

Foram especificados 4 corpos de prova, sendo um deles fabricado sem defeitos e os outros contendo descolamentos circulares de diâmetros variados, artificialmente provocados. A forma circular foi escolhida em função da simetria de sua geometria e, em geral, tem sido classicamente o formato preferido para defeitos colocados em peças padronizadas, no desenvolvimento de técnicas NDT [90 - 92]. As dimensões foram especificadas de acordo com informações do fabricante e visam determinar a resolução espacial que a HE apresenta para NDT, neste caso.

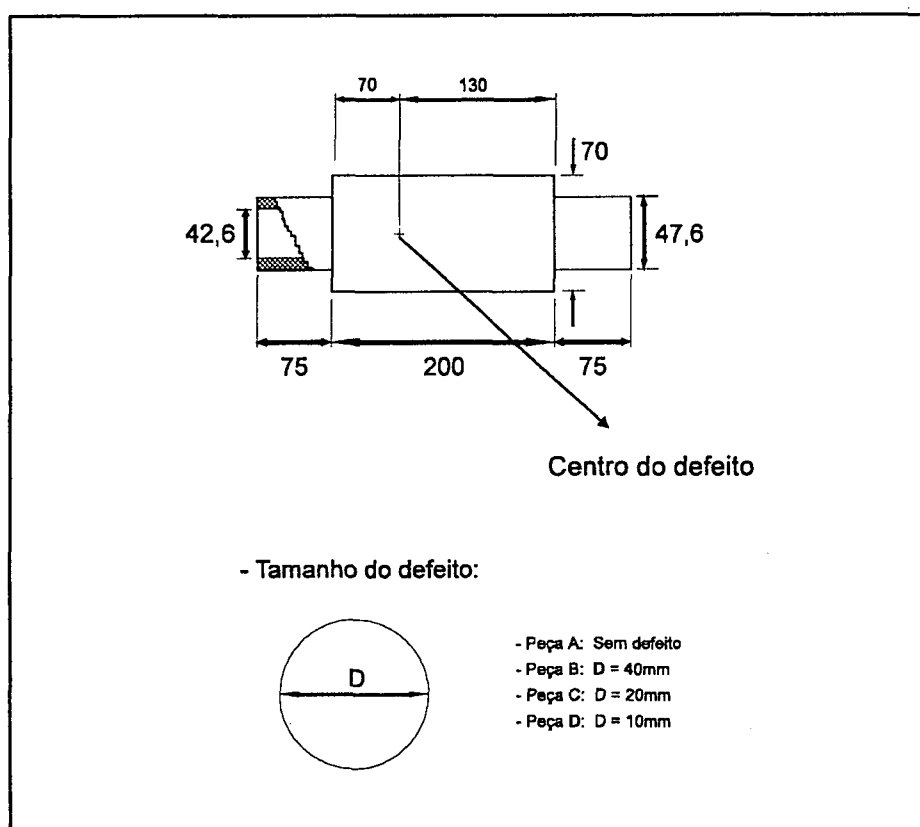


Figura 6.1 - Corpo de prova padronizado

Os descolamentos foram provocados pela inserção de material na interface metal/borracha durante o processo de fabricação, causando a desejada falta de adesão. Por este método, muito provavelmente, os dois materiais ficam descolados mas em contato (descolamento aderente), sem existência de ar na interface.

## 6.2 - ENSAIOS COM CARREGAMENTO PELO PESO PRÓPRIO

Em função de sua grande praticidade, esta alternativa de carregamento foi a primeira a ser verificada. Pretendeu-se utilizar o peso próprio do revestimento de borracha para fazer com que os deslocamentos normais à superfície ocorridos em regiões descoladas fossem diferenciados de outras regiões o suficiente para causar distorção nas franjas de interferência e possibilitar sua localização.

Na prática, o carregamento consistiu basicamente do modo descrito em 5.2.1, deixando-se a peça em repouso na horizontal apoiada em seus extremos e girando-a de  $180^\circ$ , acompanhando-se então os deslocamentos ocorridos em sua face inferior, ao longo do tempo (fluência).

Na figura 6.2 é mostrado o aparato experimental utilizado nos testes. A iluminação e visualização da face inferior do cilindro foi feita por meio de espelho inclinado a  $45^\circ$ . A presença deste espelho causou certa instabilidade no sistema, que passou a ser mais sensível às vibrações do meio. Foi utilizada a configuração de iluminação simples, com o vetor de sensibilidade sendo otimizado para os deslocamentos normais à superfície inferior do cilindro.

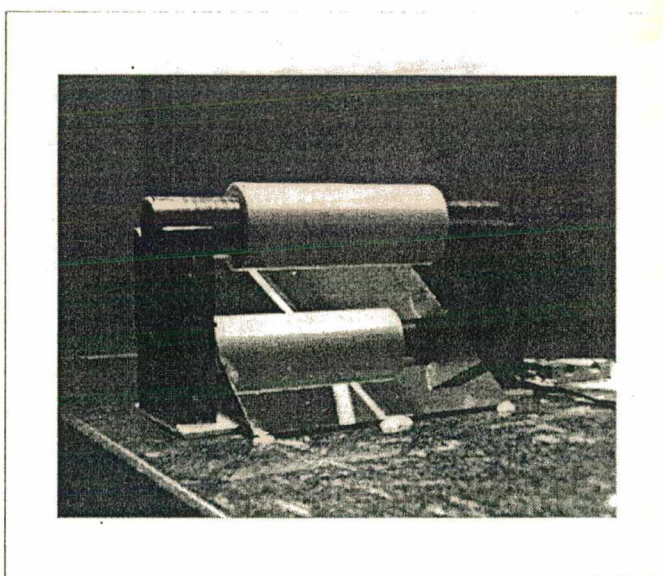


Figura 6.2 - Dispositivos utilizados

A variável a ser analisada neste carregamento foi o tempo de observação após o giro. Foram observados períodos variados, constatando-se que, a partir de cerca de 14 minutos após girar o cilindro, já não ocorrem deslocamentos significativos em sua superfície.

Devido à alta dureza desta borracha, ela pouco se deformou neste período, e esta deformação não foi suficiente para evidenciar as regiões descoladas. Obtiveram-se resultados semelhantes para peças boa e defeituosas. Este resultado pode ser visto no mapa de franjas da figura 6.3, em que se testou a peça com descolamento de 40 mm.

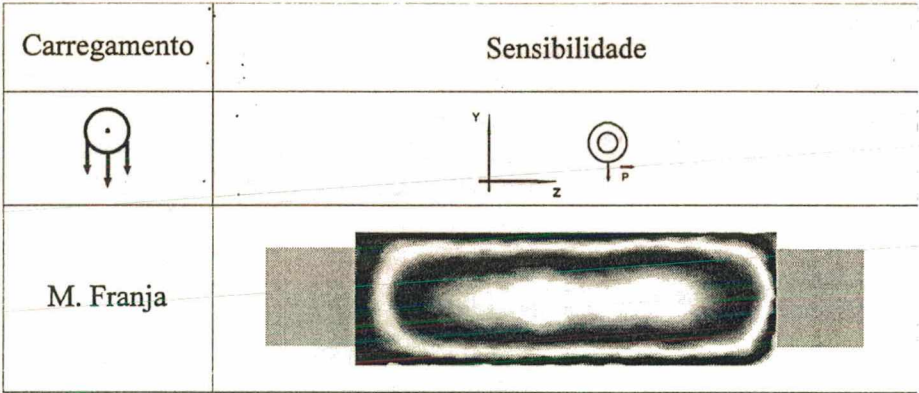


Figura 6.3 - Fluência pelo peso próprio em borracha de dureza 90

Na figura 6.4 é mostrado, para fins de comparação, o efeito do mesmo carregamento sobre um outro cilindro, revestido com borracha de baixa dureza ( $\approx 40$ ) e menor espessura de revestimento (8 mm), no qual foi provocado um descolamento em sua extremidade. Pode-se observar deslocamentos maiores bem como a fácil localização do descolamento. Para esta peça foi observado o deslocamento durante 10 minutos.

O mesmo procedimento foi realizado sobre um outro cilindro, revestido com borracha de dureza  $\approx 60$  e espessura de revestimento 6 mm. Provocou-se descolamento na extremidade esquerda e aplicou-se o carregamento. Pode-se observar na figura 6.5 que, apesar de toda a superfície da peça ter sofrido deslocamentos semelhantes aos da peça mostrada na figura 6.3, há um efeito diferenciado na região do defeito. Nestas duas figuras são indicados os locais dos descolamentos.




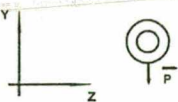

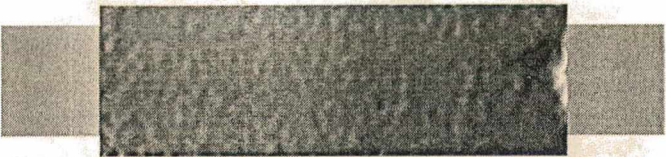
Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.4 - Fluência sobre borracha de dureza 40 e espessura 8 mm


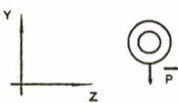
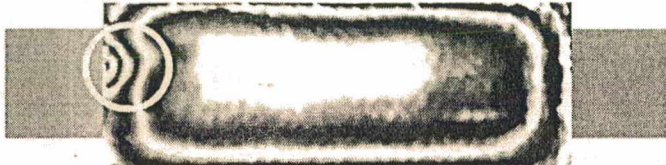

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.5 - Fluência sobre borracha de dureza 60 e espessura 6 mm

Este carregamento, apesar de sua praticidade e facilidade de realização, provoca um efeito bastante pequeno sobre a peça e, com isso, só demonstrou certa viabilidade quando aplicado a peças de baixa dureza e pequenas espessuras de revestimento e, além disso, havendo ar na interface descolada, o que facilita a deformação desta região.

Pôde ser observada, já nestes experimentos, a grande influência de variações de temperatura do meio sobre a peça. Correntes de convecção existentes no laboratório (insuflação de ar condicionado) alteraram sensivelmente a estabilidade e o comportamento das franjas, fazendo-as deslocar-se aleatoriamente sobre a peça.

Um outro aspecto observado foi a elevada sensibilidade a qualquer contato físico com a superfície da borracha, o que já indicou dificuldades na utilização de carregamentos mecânicos de superfície para este caso, bem como os cuidados a se ter com o manuseio destas peças ao longo dos experimentos. A título de ilustração, a figura 6.6 mostra a deformação causada por uma massa de 3,2 g, colocada sobre a superfície da borracha. Após retirada a massa, observou-se o retorno da borracha à sua condição original (10 minutos de observação).


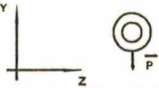


Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.6 - Deformação por efeito de esforço concentrado



A principal contribuição destes testes para o trabalho se deu mais em função da constatação destas propriedades do que propriamente nos resultados dos carregamentos, já que esta alternativa não se mostrou viável para a solução do problema em análise, embora possa ainda ser usada para casos específicos de descolamentos (pequenas espessuras de revestimento, borracha mole, ar na interface).

### 6.3 - CARREGAMENTO TÉRMICO

A tentativa de utilização de carregamento térmico para a localização dos defeitos foi motivada e dificultada basicamente pelo mesmo motivo: o grande coeficiente de dilatação térmico da borracha em relação ao metal a ela aderido. Aquecendo ou resfriando-se a peça, tentou-se provocar um efeito semelhante ao "bimetálico", descrito em 5.2.2, procurando-se obter respostas que possibilitassem a detecção dos descolamentos.

Na prática, o carregamento foi aplicado de diferentes maneiras e utilizando direções de sensibilidades variadas. A peça foi colocada sempre na horizontal, apoiada da mesma forma que no item 6.2.

Inicialmente o corpo de prova foi aquecido por **ar quente**, insuflado por meio de aquecedor sobre a superfície externa do cilindro. Ao receber o ar, a borracha dilatava-se consideravelmente e mudava completamente a sua microgeometria superficial. Isto tornou impraticável acompanhar, através das franjas, a resposta oferecida pela borracha enquanto era aquecida. Procedeu-se, então, à observação do comportamento da borracha quando resfriada a partir de certa temperatura.

Apesar de também haver grande influência de correntes de convecção do meio sobre a peça, foi possível observar ao longo do tempo a contração da borracha. Nestes novos experimentos, utilizou-se o aquecimento por **estufa**, obtendo-se melhor controle sobre a temperatura e maior homogeneidade no aquecimento sobre toda a peça. Deste modo, os ensaios de resfriamento foram realizados aquecendo-se as peças a temperaturas da ordem de 40 - 50°C e então retirando-as e observando-se a contração ocorrida.

Como forma de se obter um maior controle sobre o aquecimento, bem como possibilitar a observação da dilatação térmica do revestimento, tentou-se também aquecer a peça internamente, com resistência elétrica colocada no interior no cilindro metálico conforme a figura 6.7. A resistência foi enrolada helicoidalmente sobre uma barra de aço e então inserida no centro do cilindro. Este arranjo possibilitou um monitoramento mais eficiente da temperatura na borracha, bem como variar a taxa de aquecimento.

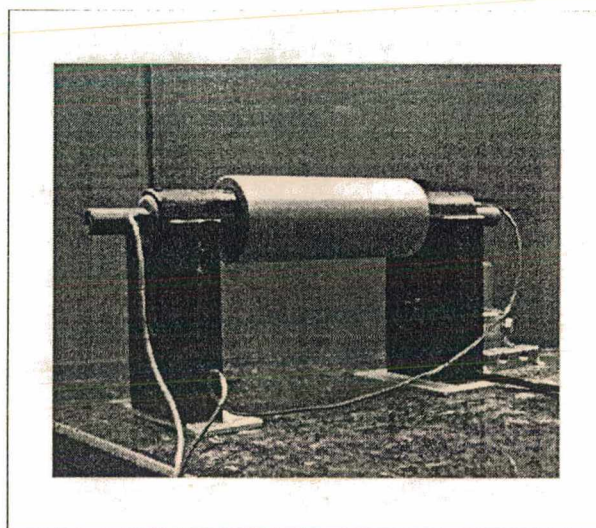


Figura 6.7 - Aquecimento por resistência elétrica

Os resultados obtidos com estes dois carregamentos foram semelhantes entre si, sendo mostrados nas figura 6.8 (peça perfeita) e 6.9 (peça com descolamentos de 40 mm), para diferentes direções de sensibilidade: normal e paralela à superfície da peça. Nesta última, é indicado o local do descolamento.



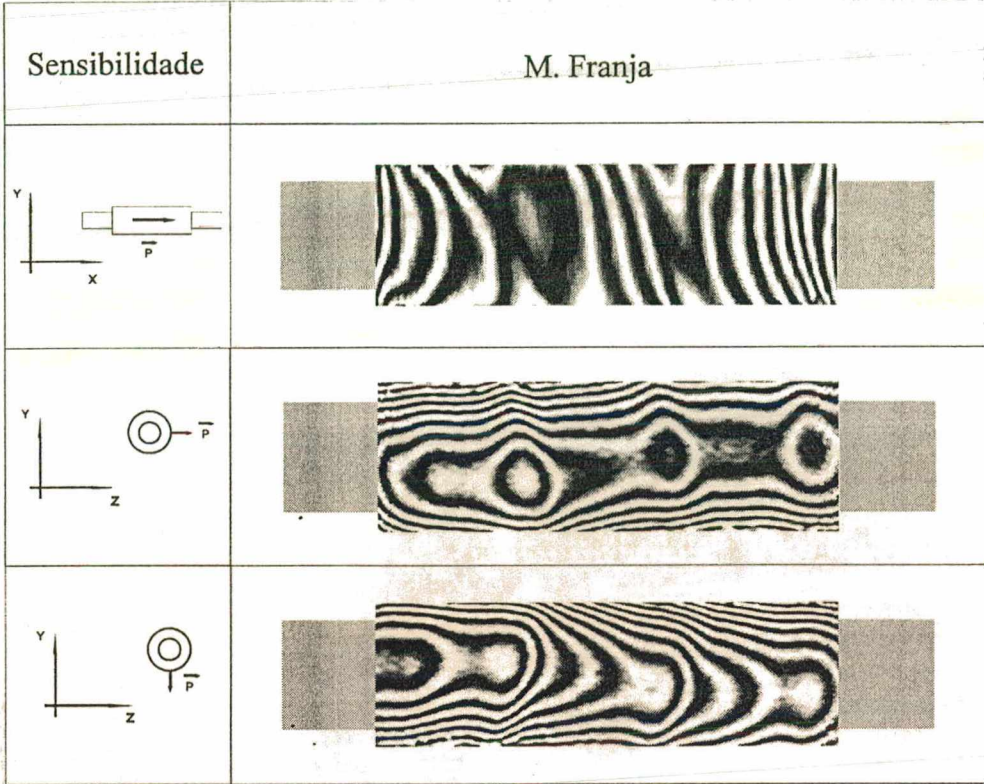


Figura 6.8 - Efeito do calor sobre peça sem defeitos

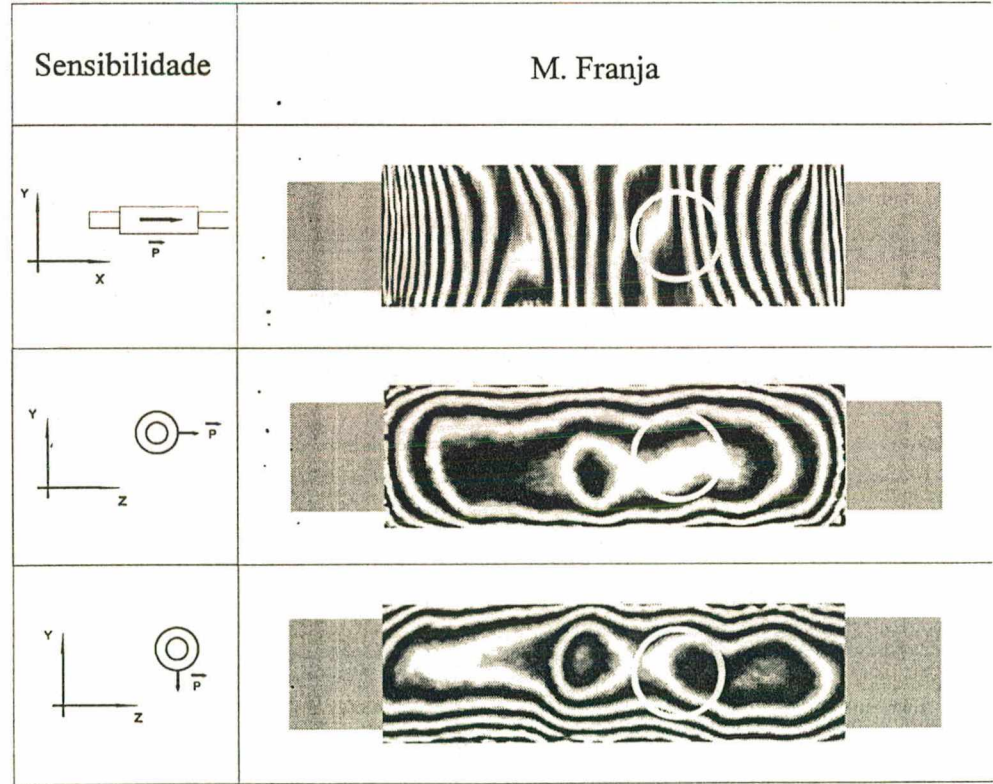


Figura 6.9 - Efeito do calor sobre peça com defeito de 40 mm

Pode-se notar em todos os resultados a presença de algumas regiões regularmente espaçadas, nas quais há um padrão bastante irregular de franjas. Isto ocorreu para peças perfeitas ou defeituosas ao longo de todos os ensaios e estas irregularidades mereceram bastante atenção e investigação, só sendo conhecidas de forma conclusiva quando se fez o processamento das imagens por meio do gradiente (item 3.3.3) sobre os mapas de fase.

Como resultado, obtiveram-se imagens indicando claramente a existência de linhas regularmente espaçadas, onde a deformação havia sido, por algum motivo, diferenciada do restante da peça. Mais ainda, se processado o mapa de fase relativo ao lado oposto do mesmo cilindro, estas linhas apareceriam paralelas e em posições intermediárias às anteriores. Esta observação, juntamente com informações do fabricante permitiram concluir que se tratam de regiões com variação na densidade da borracha, proveniente do processo de fabricação. Mais especificamente, são função do modo com que a borracha é aplicada sobre o metal (figura 4.7). Ao ser aplicada e posteriormente aquecida, a borracha escoa e se conforma, mas não adquire uma estrutura homogênea ao longo do cilindro. Deste modo causam-se não homogeneidades dispostas helicoidalmente na peça. A este problema chamou-se **efeito hélice**. Com a sensibilidade otimizada para deslocamentos horizontais e paralelos à superfície da borracha, este efeito se fez notar mais claramente.

Na figura 6.10 são mostrados os resultados do gradiente, quando aplicados sobre os mapas de fase mostrados nas figuras 6.8 e 6.9. Na figura 6.11 pode-se ver os gradientes dos dois lados de uma mesma peça, visualizando-se melhor o efeito hélice.



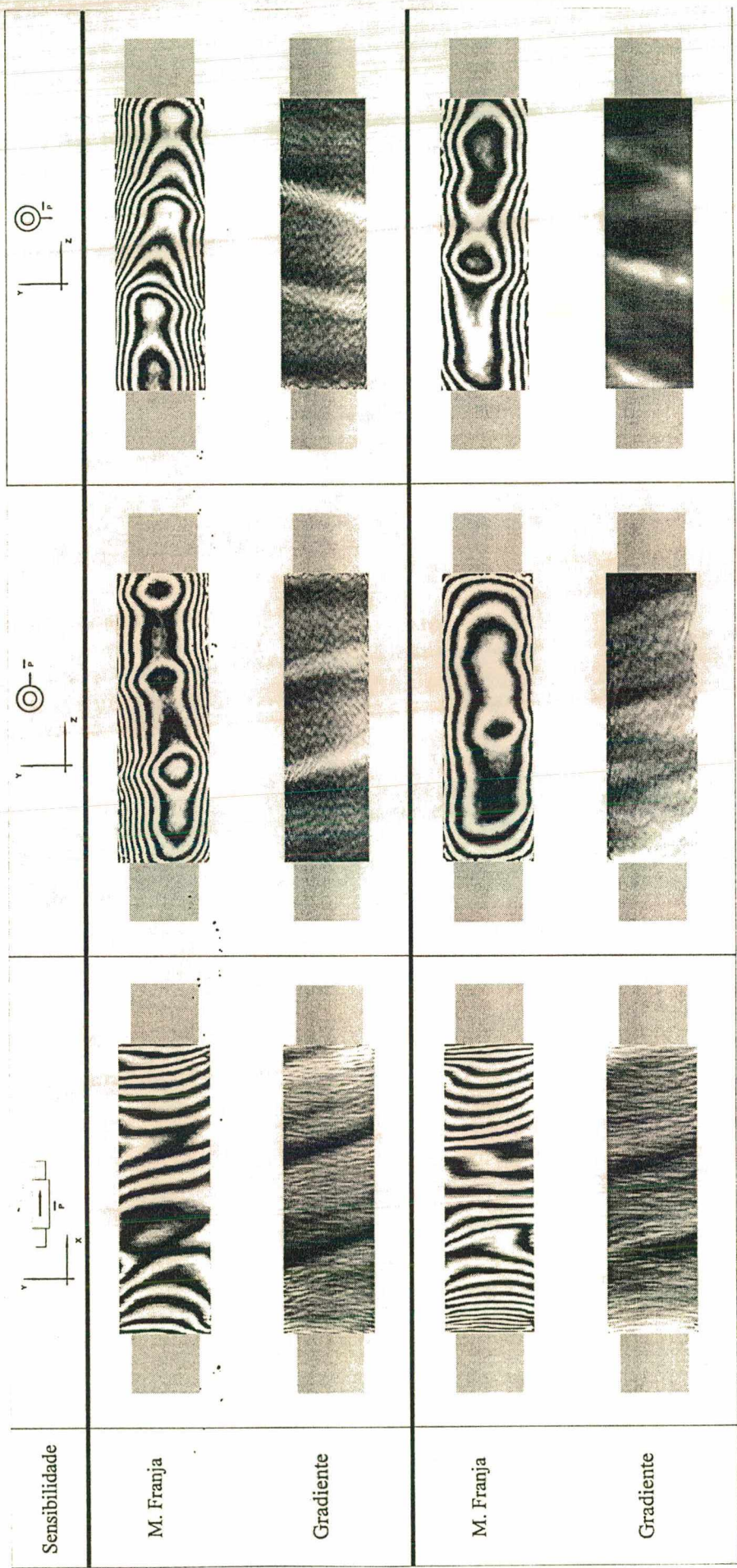


Figura 6.10 - Resultados da aplicação do gradiente

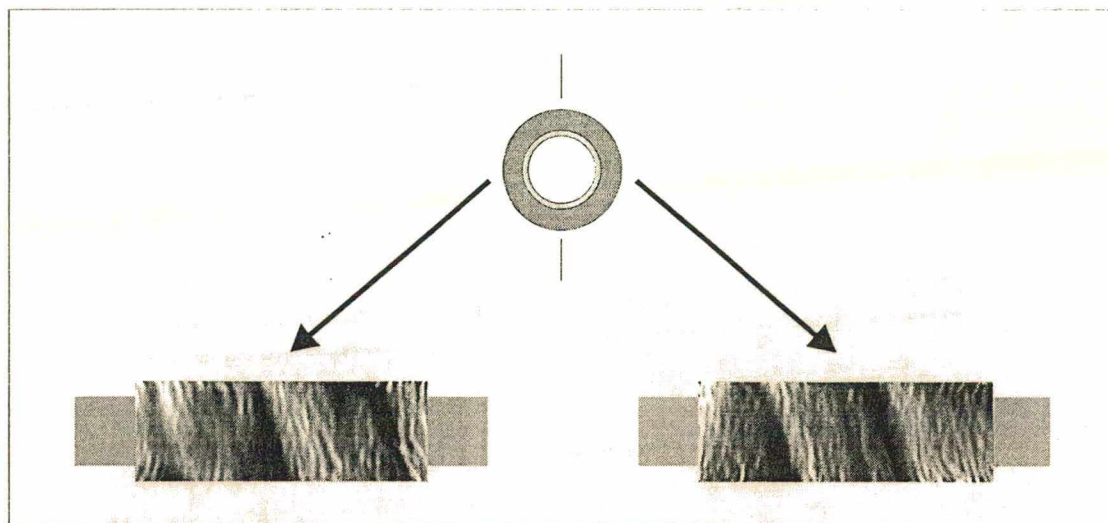


Figura 6.11 - Gradiente sobre lados opostos de uma mesma peça

Em relação aos descolamentos, este carregamento não produziu respostas que possibilitassem localizá-los e as respostas de peças perfeitas ou defeituosas foram semelhantes, impossibilitando também a localização de falhas por comparação com um padrão. A presença destas não-homogeneidades é um fator complicante para esta inspeção, visto que pode se superpor e "mascarar" a existência de descolamentos.

O outro grande complicante nos experimentos foi o grande coeficiente de dilatação térmica da borracha. À medida que a borracha era aquecida ou resfriada, grandes deslocamentos ocorreram em sua superfície, causando o aparecimento de uma alta densidade de franjas, e por diversas vezes perdendo-se a correlação da imagem, o que destrói as franjas. Deste modo, só foi possível registrar a contração/dilatação da borracha para variações de temperatura da ordem de 2 - 4°C.



#### 6.4 - CISALHAMENTO DA BORRACHA

Ao colocar o cilindro revestido para operar em condição semelhante à sua utilização normal, provocaram-se esforços mecânicos de compressão e cisalhamento sobre o revestimento procurando obter, com estes esforços, deslocamentos superficiais irregulares sobre as regiões dos descolamentos.

O carregamento foi aplicado por intermédio do dispositivo mostrado na figura 6.12, construído para este fim. Sua concepção é semelhante a algumas máquinas para ensaio de revestimentos elastoméricos [80], e permite a fixação de dois cilindros colocados em contato radial ao longo de seus revestimentos, com liberdade de rotação. Parafusos e guias permitem regular a pressão de contato entre os cilindros, bem como a liberdade de giro de um deles.

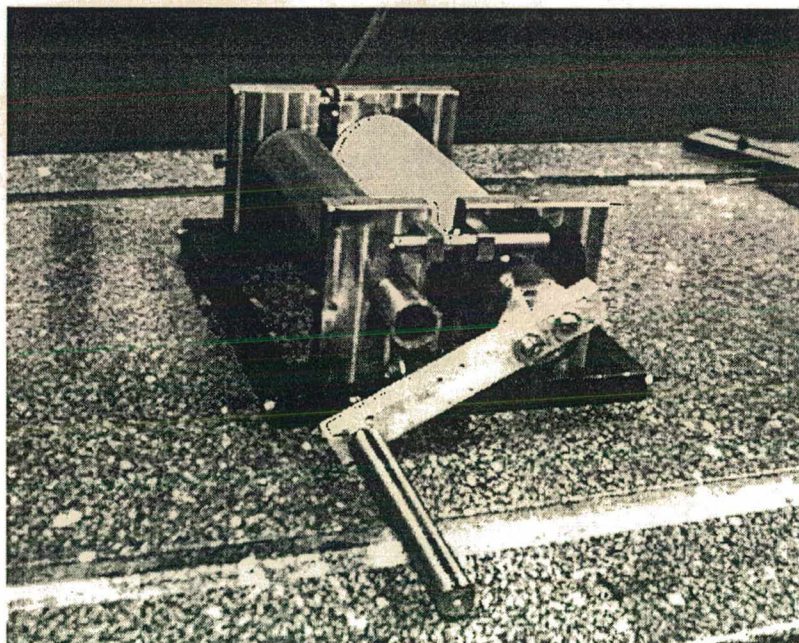


Figura 6.12 - Dispositivo para aplicação de compressão e cisalhamento

Deste modo, foi possível colocar os dois cilindros livres, aplicando-se esforço de compressão sobre o revestimento, à medida que estes eram girados à mesma velocidade, em laminação. Freando-se um dos cilindros, provocou-se o movimento relativo entre os revestimentos, causando esforços de cisalhamento sobre a borracha dos revestimentos, do modo descrito em 4.3.1.

Os ensaios de compressão entre cilindros (velocidades iguais) foram realizados buscando-se que a geração de calor na operação causasse dilatação térmica irregular sobre a borracha. Os cilindros foram colocados para girar e, após parados, observou-se o retorno da borracha à sua condição original. Variou-se a pressão de contato, embora isto não tenha causado efeito significativo sobre os resultados. A figura 6.13 mostra um resultado típico da aplicação deste esforço. Foram girados os cilindros durante 10 minutos, após o que observou-se o retorno da borracha. Utilizou-se configuração de iluminação simples, com a sensibilidade horizontal e normal à superfície da borracha. Pode-se ver que os deslocamentos superficiais foram pequenos e insuficientes para causar qualquer distorção superficial nesta peça, mesmo com o descolamento de 40 mm.

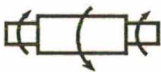
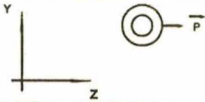
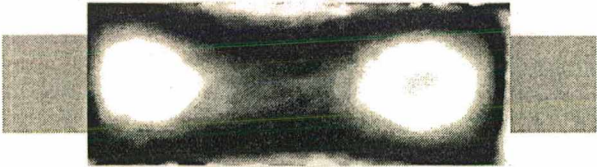

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.13 - Resultado da compressão



Os experimentos com cisalhamento, no qual os cilindros giravam a velocidades diferentes, provocaram um efeito superficial bem maior do que a compressão. Da mesma forma foi observado o retorno da borracha após a retirada do esforço, com configurações de simples e dupla iluminação otimizando a sensibilidade para deslocamentos horizontais, normais e paralelos à superfície da borracha. Na figura 6.14 estão dispostos os resultados deste carregamento para estas duas direções de sensibilidade.

Pode-se ver que as não-homogeneidades (efeito hélice) presentes na borracha apareceram nestes resultados de forma bastante evidente, principalmente pela dilatação térmica com o calor gerado pelo atrito, juntamente com a variação na dureza da borracha nestas regiões não homogêneas. Neste ensaio, um dos cilindros foi completamente freado, sem liberdade de giro.

De certa forma, estes resultados eram esperados, em função das informações obtidas com o aquecimento, que evidenciavam bastante as não-homogeneidades sobre a borracha. Uma dificuldade encontrada ao longo dos ensaios foi garantir uma aplicação uniforme do esforço sobre a peça, dado que a peça era girada manualmente através de manivela. Qualquer desvio provocava efeitos bem significativos sobre os resultados. Além disso, o nível de esforço empregado sobre as peças também ficou limitado a valores bem abaixo do suportado pelo revestimento em condições normais de operação.

Em relação à localização dos defeitos, esta alternativa também não se mostrou promissora por não provocar efeito diferenciado quando aplicado em peças boas ou defeituosas, além de envolver contato mecânico e geração de calor, com seus complicantes conhecidos sobre o teste do revestimento.

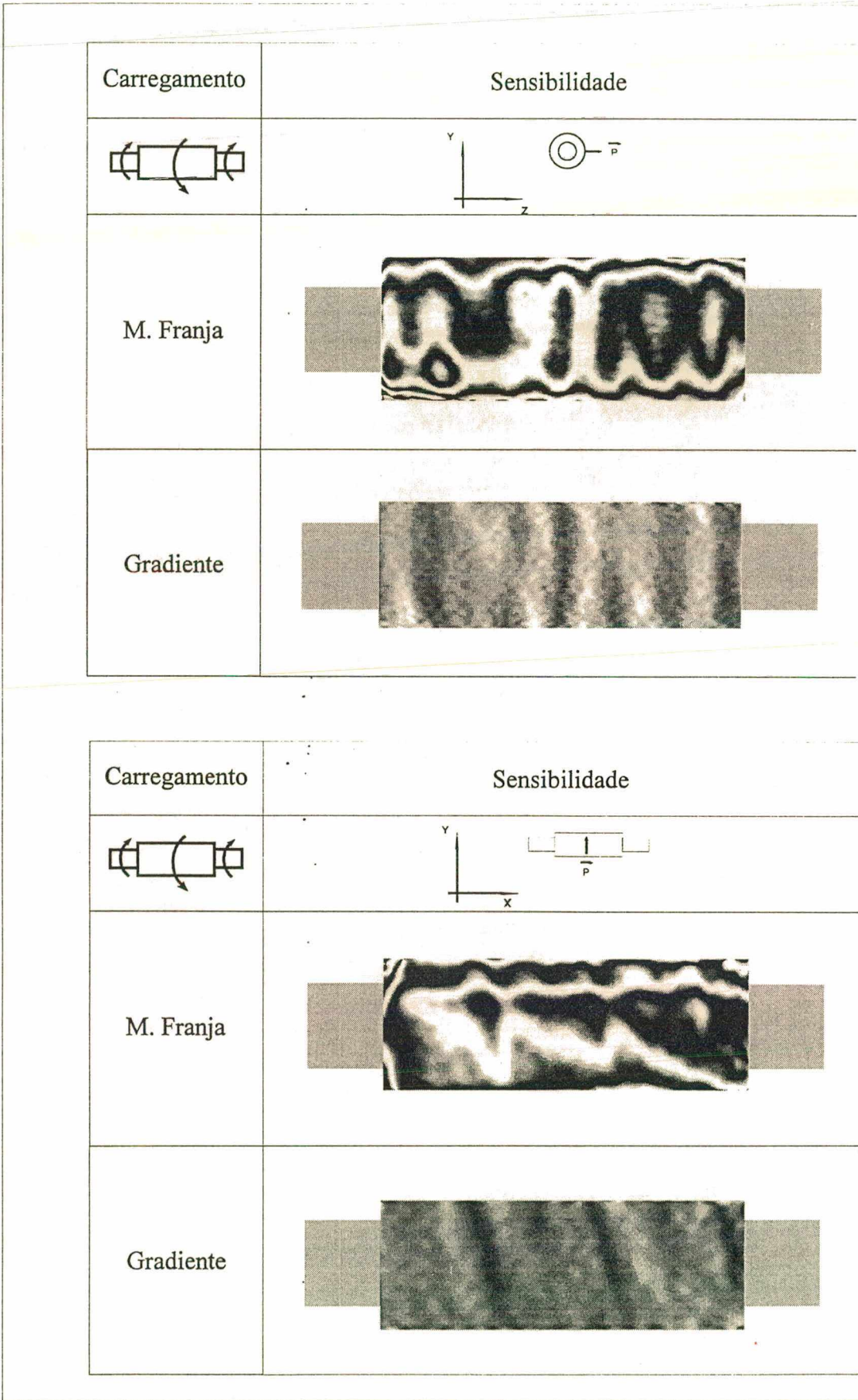


Figura 6.14 - Resultados do cisalhamento sobre a peça com defeito de 40 mm

## 6.5 - FORÇA CENTRÍFUGA

Este carregamento foi idealizado tentando-se aproveitar as características geométricas da peça, bem como o tipo de defeito, e é bastante específico para o caso aqui estudado. Não se encontrou registro de sua utilização em nenhuma literatura e trabalho, pesquisados ao longo desta dissertação.

A aplicação da rotação como carregamento foi utilizada de modo a intensificar o efeito causado pelo peso próprio (6.2), constituindo-se em um carregamento sem contato e com pouca geração de calor, fornecendo perspectivas de resultados bastante positivos.

Para colocar-se a peça em rotação, construíram-se mancais com rolamentos radiais de esferas sendo colocados nos extremos dos cilindros, tampando-os. O anel externo do rolamento ficou fixo ao cilindro enquanto o interno permaneceu livre. Apoiando-se estes anéis internos entre pontas permite-se a liberdade de rotação para todo o conjunto. Para suportar o cilindro foi utilizada uma base de uma máquina de medir, com rigidez e alinhamento satisfatórios e a transmissão de potência se fez através de polia/correia plana, utilizando-se a superfície do cilindro como polia movida. Todo o conjunto pode ser visto na figura 6.15.

Com um motor elétrico monofásico com 186,5 W (1/4 HP) de potência e 8000 rpm de rotação nominal, e utilizando-se uma polia de 70 mm acoplada ao eixo do motor, conseguiu-se levar a peça a rotações em torno de 7000 rpm. Alterações na tensão da correia faziam variar este valor mas procurou-se manter este nível de rotação para os ensaios realizados nesta etapa.



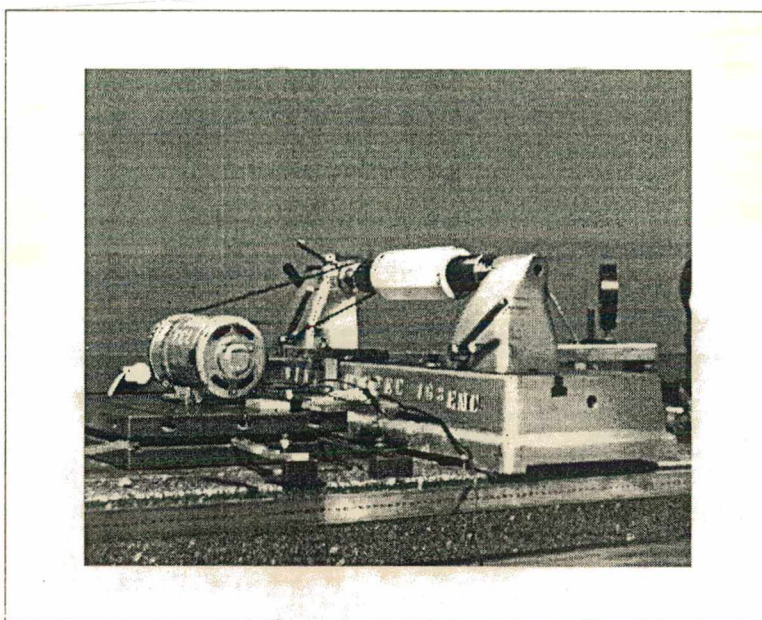

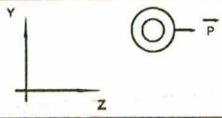





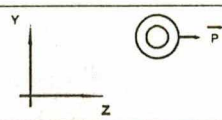


Figura 6.15 - Aparato para aplicação da rotação

As peças foram postas nesta rotação por certo período de tempo e após desligado o motor, as mesmas eram freadas rapidamente. A partir deste instante era observado, através das franjas, o retorno da borracha à sua condição original. Regiões que sofrem maior deslocamento durante o carregamento irão, igualmente, deslocar-se mais até retornar à posição original, causando irregularidades nas franjas. Todas as peças foram testadas seguindo-se este procedimento, obtendo-se resultados bem satisfatórios na peça com o descolamento de 40 mm e tornando esta alternativa bastante promissora para aprofundamentos futuros.

Na figura 6.16 são mostrados os resultados (mapa de franjas e gradiente) iniciais da aplicação da força centrífuga sobre a peça padrão e sobre a peça com defeito de 40 mm. Deve-se observar a diferença entre as respostas oferecidas pelas duas peças (qualificação comparativa), bem como a fácil localização da falha (qualificação indicativa).

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Rotação de 6800 rpm sobre peça com descolamento de 40 mm

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Rotação de 6800 rpm sobre peça sem descolamento

Figura 6.16 - Resultados da aplicação da força centrífuga



Os resultados sobre as peças com defeitos de 20 e 10 mm não foram tão satisfatórios com esta magnitude de carregamento. Na figura 6.17 pode-se observar o mapa de franjas e o gradiente resultantes deste carregamento sobre a peça com defeito de 20 mm, com o sinal indicando o local do defeito. A localização é bem menos evidente do que o de 40 mm. A repetibilidade deste resultado também foi bem pior do que para aquele mostrado na figura 6.16.


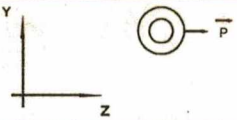

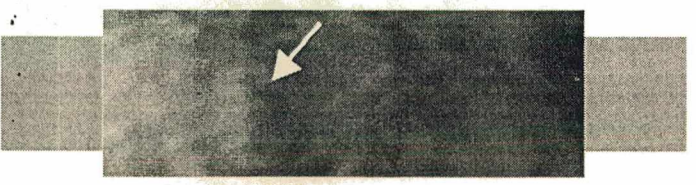
Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.17 - Rotação de 6800 rpm: descolamento de 20 mm

Em todos estes resultados acima utilizou-se configuração de simples iluminação, com a sensibilidade adequada para deslocamentos horizontais e normais à superfície da peça. Também foi testada a configuração de dupla iluminação, obtendo-se bons resultados somente para o defeito de 40 mm, como pode ser visto na figura 6.18. Esta opção demonstrou repetibilidade pior do que a iluminação simples.




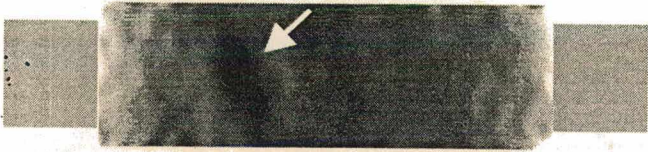
Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.18 - Rotação de 6800 rpm sobre peça com descolamento de 40 mm

A principal dificuldade encontrada neste carregamento ocorreu pela rotação indesejada que a peça sofria durante a observação com o sistema. Após frear a peça e iniciar-se a observação, ocorrem movimentos de corpo rígido (rotação), causando o aparecimento das diversas franjas horizontais e equi-espaçadas, vistos nos mapas de franja de todas as figuras acima onde se utilizou iluminação simples. Isto fez diminuir a percepção que se teria do defeito, bem como a repetibilidade dos resultados. As vibrações ocorridas para certas magnitudes de rotação causou alguns problemas de estabilidade no sistema.

Apesar deste e de outros problemas, no aspecto geral, esta alternativa de carregamento mostrou-se bastante promissora e sobre ela foram feitos maiores aprofundamentos, procurando-se minimizar problemas e buscar as condições de carregamento e observação mais adequadas para sua aplicação ao caso em análise. Estes aprofundamentos serão discutidos no capítulo 7 deste trabalho.



## 6.6 - APLICAÇÃO DE VÁCUO

Apesar do ensaio com rotação ter levado a resultados promissores, resolveu-se testar o vácuo como alternativa de carregamento principalmente pelo histórico favorável de sua utilização para NDT com HE, notadamente para inspeção de certos descolamentos e vazios em materiais compostos.

Nestes casos, o vácuo tem se apresentado como uma opção bastante eficiente de carregamento com as vantagens de fácil controle sobre o carregamento, esforço aplicado uniformemente sobre toda a peça, além de não haver contato físico e geração de calor sobre a peça, propiciando uma visualização fácil e rápida de regiões defeituosas. As dificuldades encontradas relacionam-se a riscos na despressurização, bem como na deformação sofrida pela câmara de vácuo, entre outras (item 3.4.3-2).

O efeito do vácuo sobre peças tem sido analisado de dois modos: a) observando-se a fluência sofrida pelo corpo após aplicação ou retirada rápida do vácuo, b) acompanhando-se as deformações à medida que o vácuo vai gradualmente sendo aplicado ou retirado. Nos ensaios realizados neste trabalho estes dois métodos foram testados. Em todos os ensaios utilizou-se a configuração de iluminação simples, pelo tipo de resposta oferecido pela peça ao esforço (deslocamentos radiais).

Inicialmente, utilizou-se uma câmara de vácuo construída a partir de tubos de PVC rígido, não permitindo a visualização de seu interior. Deste modo, nos ensaios realizados com esta câmara observou-se a fluência sofrida pela peça após a retirada do ambiente com vácuo. Aplicava-se certa magnitude de vácuo à câmara, deixando a peça no seu interior sob esta depressão durante determinado período. Após a câmara ser aberta e rapidamente a pressão atmosférica restabelecida, a peça era levada à bancada para observação do retorno da borracha. A figura 6.19 ilustra este procedimento.



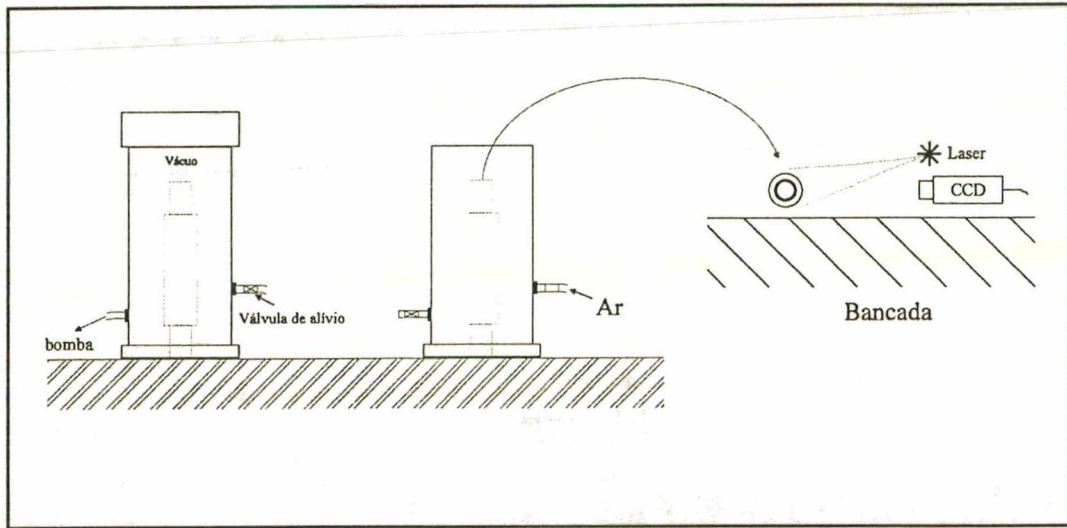


Figura 6.19 - Procedimento inicialmente utilizado para aplicação do vácuo

Com este arranjo, submeteu-se os cilindros a magnitudes de vácuo até da ordem de  $260 \text{ tor}^1$ , retirando-os da câmara e observando-se os deslocamentos durante 20 minutos. Os resultados ao longo destes testes não indicaram a presença de nenhum dos defeitos nas peças. A figura 6.20 mostra o resultado ao se aplicar este carregamento sobre a peça com o defeito de 40 mm. A região do defeito é indicada.

Nestes experimentos pôde-se observar a influência que o ar causava ao entrar a alta velocidade na câmara, quando a válvula era aberta. O impacto do ar sobre a borracha causou deformações localizadas, podendo ser facilmente observadas na figura 6.21, na forma de mapa de franjas e gradiente. Este problema foi contornado deslocando-se a válvula de alívio para um ponto acima da altura ocupada pela borracha.

O principal problema neste tipo de experimento foi o tempo necessário para levar-se a peça do interior da câmara à bancada. Para esta operação demorava-se um tempo médio de 5 segundos e pôs-se em dúvida se isto estaria comprometendo os resultados obtidos. Além disso, a magnitude do carregamento ficou limitada aos 260 tor. Tentativa de aumentar o vácuo provocou a implosão da câmara, ao nível de 160 tor.

<sup>1</sup> 1 tor = 1 mm Hg = 131,579 Pa


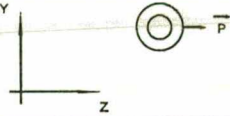
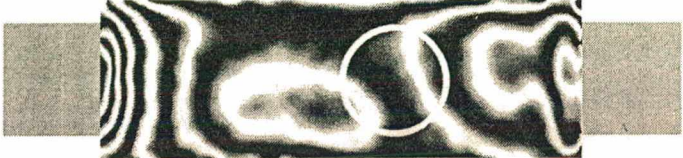

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.20 - Vácuo sobre peça com descolamento de 40 mm


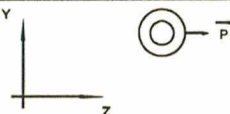


Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 6.21 - Efeito do impacto do ar sobre a borracha



Como forma de superar essas limitações tentou-se um novo arranjo experimental, empregando desta vez uma câmara de alto vácuo, fabricada em vidro temperado e incolor, utilizada em processo de tratamento químico de superfícies metálicas. Com isto, seria possível observar a deformação à medida que o vácuo era estabelecido/retirado, como também a fluência sofrida pela borracha imediatamente após a retirada do vácuo. O aparato experimentado pode ser visto na figura 6.22, estando a câmara apoiada em uma placa de alumínio, pelo inferior da qual o ar era retirado. O cilindro fica fixado horizontalmente, pelas extremidades, em suportes apoiados sobre esta placa.

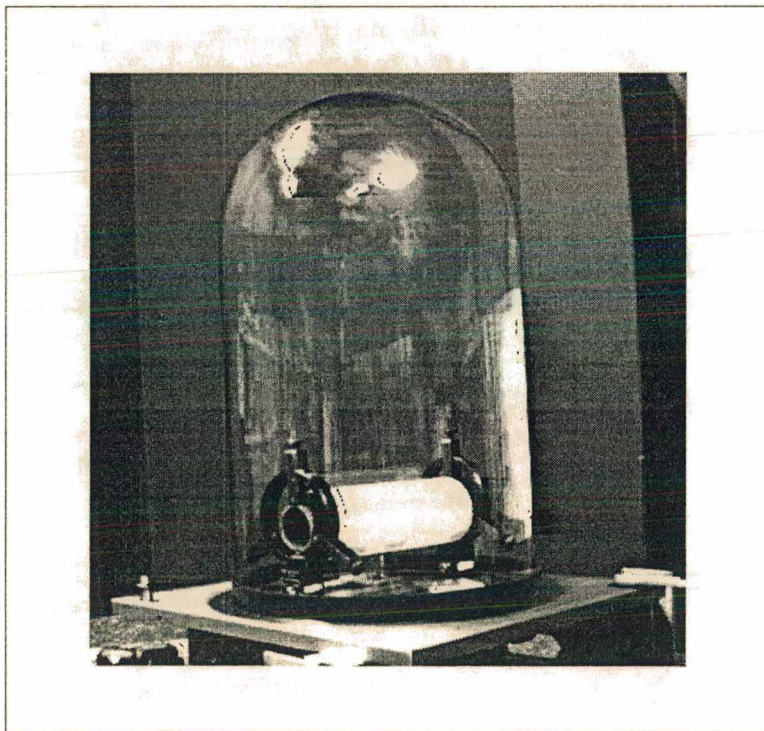


Figura 6.22 - Câmara de vácuo

No entanto, as tentativas de aplicar o vácuo lentamente e observar as deformações conseqüentes resultaram sempre no aparecimento de várias franjas horizontais equi-espçadas e na perda de contraste destas franjas, com rápida perda de correlação.

Observou-se que o problema ocorre devido a dois fatores básicos:

- 1) Ao se aplicar o vácuo, a placa de alumínio se deforma e desloca verticalmente o cilindro sobre ela apoiado (figura 6.23). Isto causava o aparecimento das franjas horizontais, da mesma forma que a rotação da peça durante a observação na força centrífuga (item 6.5), embora este deslocamento por si só não devesse causar a perda de contraste mencionada. Isto ocorre devido ao outro fator.
- 2) O vidro do qual é feita a câmara não é perfeitamente homogêneo, possuindo diversas desuniformidades de estrutura ao longo de sua espessura e superfície. Quando se iluminava a peça com o Laser através deste vidro, estas desuniformidades eram projetadas sobre a peça e interferiam no padrão de speckle gerado na superfície. Deste modo, qualquer movimento relativo entre o vidro da câmara e a peça causa alteração no padrão de speckle e, conseqüentemente, nas franjas. Este deslocamento ocorre sempre que a placa se deforma, e isto causou a perda de contraste das franjas.

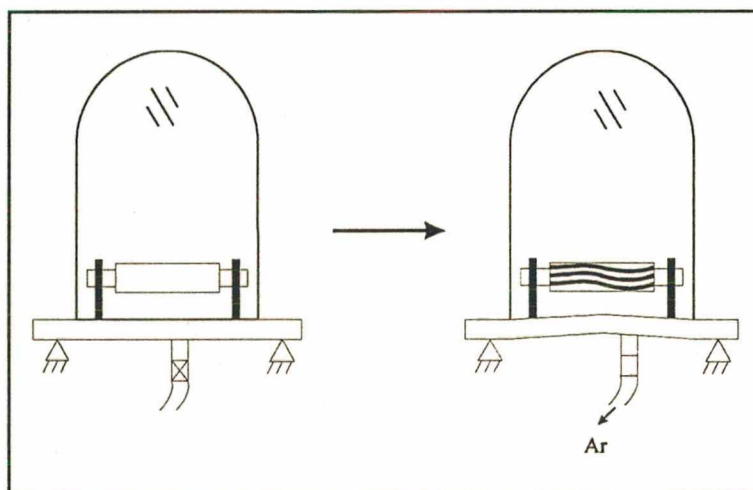


Figura 6.23 - Deformação da placa com vácuo

Devido a este problema, não se conseguiu observar deslocamentos causados por variação de pressão maior do que 50 tor e os resultados não apresentaram significância em relação aos descolamentos presentes nas peças.



Em vista deste problema, o único meio possível de carregar a peça foi pelo ensaio de fluência. Foram aplicados vácuos até da ordem de 0,1 tor, deixando-se a peça em repouso nesta condição por períodos de até 30 minutos, após o que a pressão retornava à atmosférica e então observavam-se os deslocamentos superficiais por determinado período, até a peça entrar em repouso.

A figura 6.24 apresenta resultados típicos, obtidos para estas condições de ensaio, podendo-se deles fazer algumas observações:

- A temperatura do ar dentro da câmara de vácuo varia enquanto a pressão diminui, por ação da bomba, ou aumenta, ao se abrir a válvula. A temperatura decresce no interior à medida que o ar vai sendo retirado da câmara, entrando em equilíbrio com o ambiente um certo tempo após terminada a expansão. O inverso ocorre quando a pressão é rapidamente aumentada, ao se permitir a entrada do ar pela válvula de alívio. Nesta operação a temperatura no interior da câmara cresce, ultrapassando a temperatura ambiente, para novamente entrar em equilíbrio após certo tempo. Isto provocou troca de calor entre o ar e a borracha, causando influência nos resultados.

- Quando a válvula é aberta, a borracha recebe calor do ar e esta troca causa um efeito (dilatação térmica) contrário à contração ocorrida com a retirada do vácuo. Ao longo dos experimentos isto pôde ser observado e, embora os deslocamentos por efeito da retirada do vácuo se superpussem à dilatação térmica, há sempre uma atenuação. A troca de calor é responsável pelo desordenamento e pouca repetibilidade nas franjas, embora o gradiente tenha revelado sempre as mesmas informações: o efeito hélice (figura 6.24).

- O diferencial de pressão para o vácuo é limitado a 1 bar e este esforço não foi suficiente para ressaltar os defeitos nestas peças. Devido à dureza da borracha e à espessura do revestimento, os deslocamentos superficiais sofridos pela borracha foram insuficientes para evidenciar de forma conclusiva os defeitos presentes. Outro aspecto que certamente limitou os deslocamentos radiais sobre os defeitos foi o fato de não haver cavidade de ar na interface descolada.

Em relação às outras alternativas de carregamento experimentadas, a aplicação do vácuo foi a opção menos prática de implementação e as limitações dos aparatos experimentais disponíveis foi um dificultante ao longo de todos os ensaios.

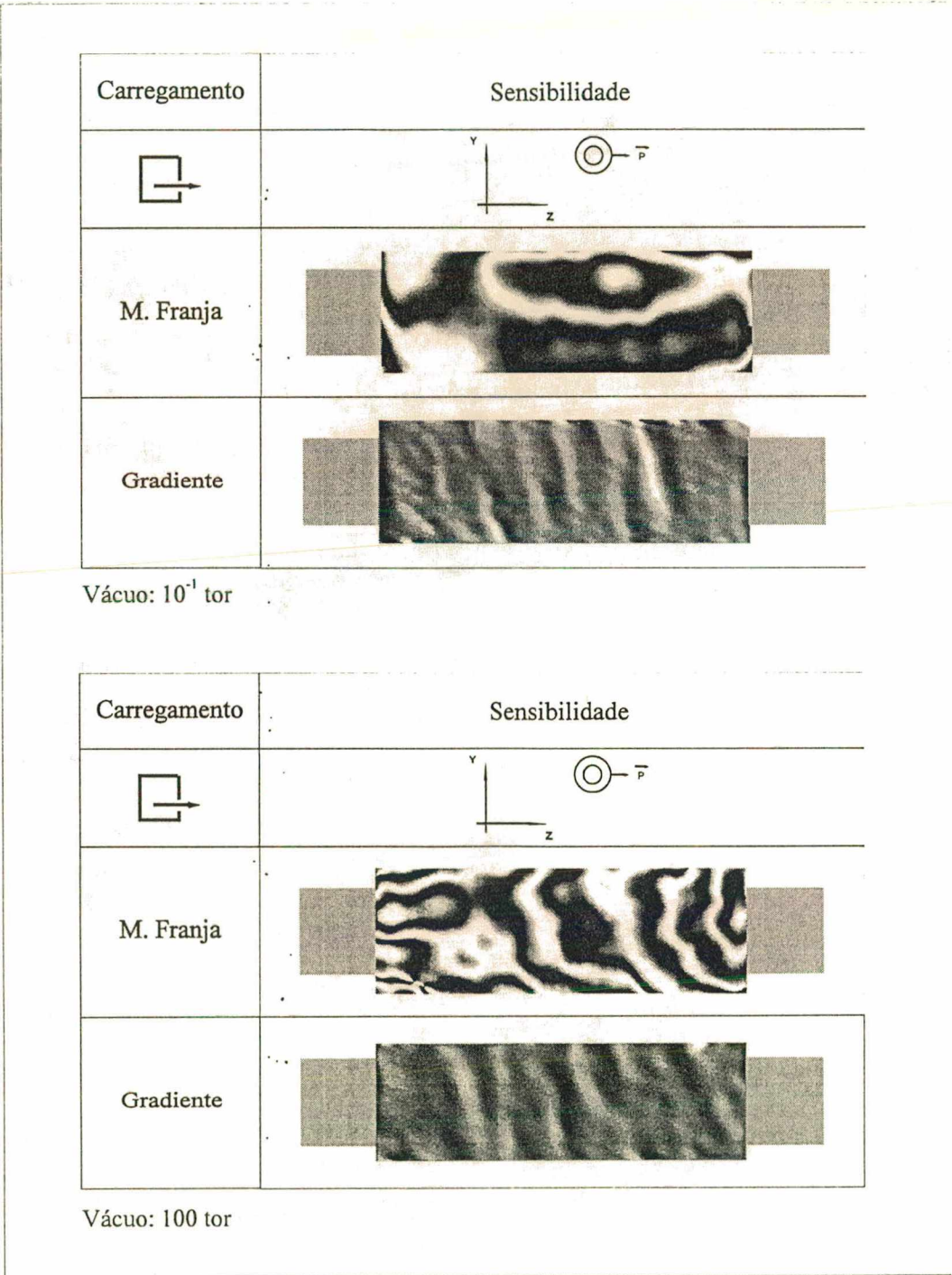


Figura 6.24 - Fluência pela retirada do vácuo



## 7. APROFUNDAMENTO E PADRONIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Após a realização dos testes de viabilidade descritos no capítulo anterior, a força centrífuga se destacou como a alternativa mais promissora de aplicação do carregamento ao caso em estudo, demonstrando relativa eficiência em provocar os efeitos superficiais que identificam os descolamentos, com boa repetibilidade, praticidade de aplicação e uniformidade sobre toda a peça.

Este capítulo contém aspectos relacionados a um maior aprofundamento experimental desta opção, com o desenvolvimento e padronização das condições mais eficientes de carregamento e observação. Serão também descritos aspectos relativos à quantificação de defeitos com HE (genéricos e específicos a este caso).

### 7.1 - ASPECTOS DE QUANTIFICAÇÃO DE DEFEITOS

Em HE, a quantificação de defeitos é sempre feita pela medição dos deslocamentos ocorridos sobre as falhas, causadas pela aplicação de um esforço conhecido sobre a peça. A partir do valor medido pode-se chegar ao tamanho da falha por métodos puramente experimentais ou híbridos (numérico-experimental).

Quando a quantificação é feita pelo método **experimental**, procura-se correlacionar empiricamente o tamanho dos defeitos inclusos em peças padronizadas com os deslocamentos ocorrentes sobre eles pela aplicação do carregamento. Um exemplo desta aplicação é a tentativa de quantificação de vazios em materiais laminados [93]. Fabricam-se corpos de prova com defeitos de tamanhos variados, submete-os a um carregamento constante (normalmente vácuo) e mede-se os deslocamentos ocorridos sobre as falhas, procurando-se correlacionar tamanho de defeito com deslocamento superficial.

A quantificação por métodos **híbridos** se faz pela geração de modelos da peça a testar, contendo defeitos simulados de diversos tamanhos. O processamento destes modelos permitirá a obtenção de curvas e/ou coeficientes que relacionem deslocamentos superficiais ao tamanho das falhas. Os resultados experimentais são comparados com estes dados de modo a possibilitar a quantificação do defeito [94]. A geração de modelos sempre envolve simplificações que podem induzir a erros consideráveis.

Em ambos os métodos de quantificação, é de extrema dificuldade obter na prática resultados com boa confiabilidade, pois todos os diversos fatores influentes na deformação da peça com o carregamento devem ser mantidos constantes com a única variável sendo o tamanho da falha. Tomando como exemplo o caso aqui estudado, as peças comercializadas pelo fabricante deveriam ser absolutamente iguais, em dimensões e tipo de borracha, os carregamentos deveriam ser aplicados sempre do mesmo modo, além dos defeitos terem sempre a mesma forma geométrica. Somente sob estas condições se poderia obter, numérica ou experimentalmente, bases de comparação razoavelmente confiáveis para o estabelecimento da correlação entre tamanho de defeito e deslocamento superficial.

Os trabalhos realizados nesta área são feitos sob estas condições específicas e sua validade prática é bastante questionável, além da incerteza dos resultados ser alta. A quantificação confiável dos deslocamentos nos cilindros revestidos é extremamente difícil em vista do grande número de valores assumidos por todas as variantes que influem na deformação da peça com o carregamento, principalmente os diversos tamanhos de peças e tipos de borracha produzidas pelo fabricante. Para cada uma delas se deveria desenvolver uma técnica de quantificação específica e, só após, a viabilidade da generalização do problema poderia ser analisada.



## **7.2 - APROFUNDAMENTO EXPERIMENTAL**

Os ensaios de aprofundamento permitiram conhecer melhor os problemas e limitações do carregamento para a localização dos defeitos e visaram basicamente melhorar as condições experimentais sob as quais os ensaios de viabilidade haviam sido feitos. Após obtenção de melhorias satisfatórias, padronizaram-se as condições experimentais para cada peça ensaiada. Com isso foi possível decidir-se pela adequação da HE para localização dos descolamentos nos cilindros revestidos.

As atividades iniciais consistiram da minimização de certos problemas:

### **7.2.1 - Compensação de deslocamento de corpo rígido**

Como mencionado em 6.5, após frear-se a peça e observar o retorno da borracha, sempre ocorreu uma rotação indesejada do cilindro durante a observação. Isto ocorreu basicamente pela acomodação dos rolamentos dos mancais, além da contração térmica da correia que se aquecia com a transmissão de potência. Este deslocamento causou o aparecimento de muitas franjas horizontais e, por várias vezes, perda de correlação.

Com isso ficou impraticável acompanhar-se por muito tempo o retorno da borracha, obtendo-se uma menor percepção dos defeitos e pouca repetibilidade nos resultados<sup>1</sup>, além de dificuldades para filtragem e posteriores processamentos. Para contornar esta dificuldade tentaram-se diversas técnicas de compensação e aqui serão descritas as que melhor se adequaram.

---

<sup>1</sup>A rotação causa alteração nos mapas de franjas mas não influencia o gradiente da imagem, devido a ser esta uma derivada e o deslocamento de corpo rígido uma parcela constante.

### 7.2.1.1 - Compensação manual

As rotações ocorridas eram compensadas manualmente através de outras rotações controladas. O procedimento pode ser entendido com o auxílio da figura 7.1. Uma esfera de aço foi colada sobre a superfície de uma mesa elevatória e posicionada abaixo da parte metálica do cilindro, ligeiramente fora de seu eixo de simetria. Quando a peça era freada após certo tempo em rotação, a mesa era elevada até pressionar a esfera contra o tubo, e a partir deste instante começava-se a observação com o sistema. Deslocando a mesa verticalmente, variava-se a pressão da esfera contra o tubo provocando pequenas e controladas rotações no cilindro, visualizadas através das franjas sobre a peça. Este movimento foi usado para compensar as rotações indesejáveis, diminuindo-se o número de franjas horizontais.

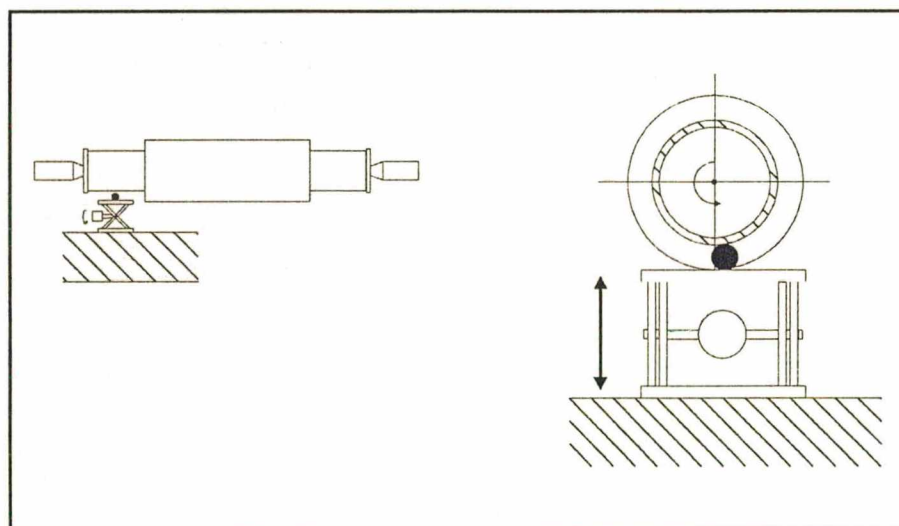


Figura 7.1 - Compensação manual do deslocamento de corpo rígido

### 7.2.1.2 - Compensação eletrônica

Nesta tentativa, a peça era freada e, após isso, forçada a manter-se nesta posição pela pressão da superfície da mesa elevatória (sem esfera), contra o tubo, segundo a figura 7.2. Deslocamentos de corpo rígido são tolerados até certa magnitude.

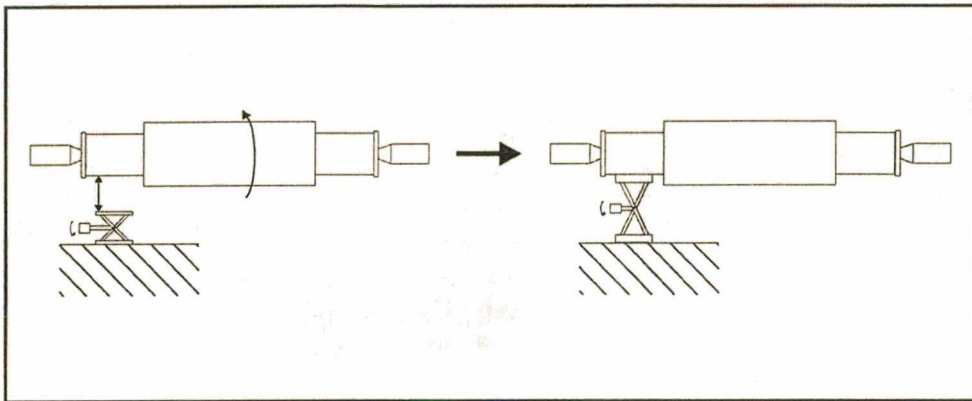


Figura 7.2 - Fixação do cilindro após rotação

Os deslocamentos ocorridos a partir desse instante são compensados digitalmente: após a obtenção do mapa de fase resultante, gera-se um mapa de fase no computador simulando uma rotação em sentido contrário àquela ocorrida na peça, e a soma destas duas imagens anula a parcela de corpo rígido.

Na prática, isto foi feito pela consideração de que os lados superior e inferior do cilindro deveriam sofrer o mesmo deslocamento normal e horizontal, caso não ocorresse nenhuma rotação. De posse dos mapas de fase, calcula-se a diferença entre os deslocamentos nestas duas extremidades usando-se este valor para gerar o mapa de fase simulado, correspondente a uma rotação inversa àquela medida. A figura 7.3 ilustra este procedimento, realizado sobre a peça sem defeitos.

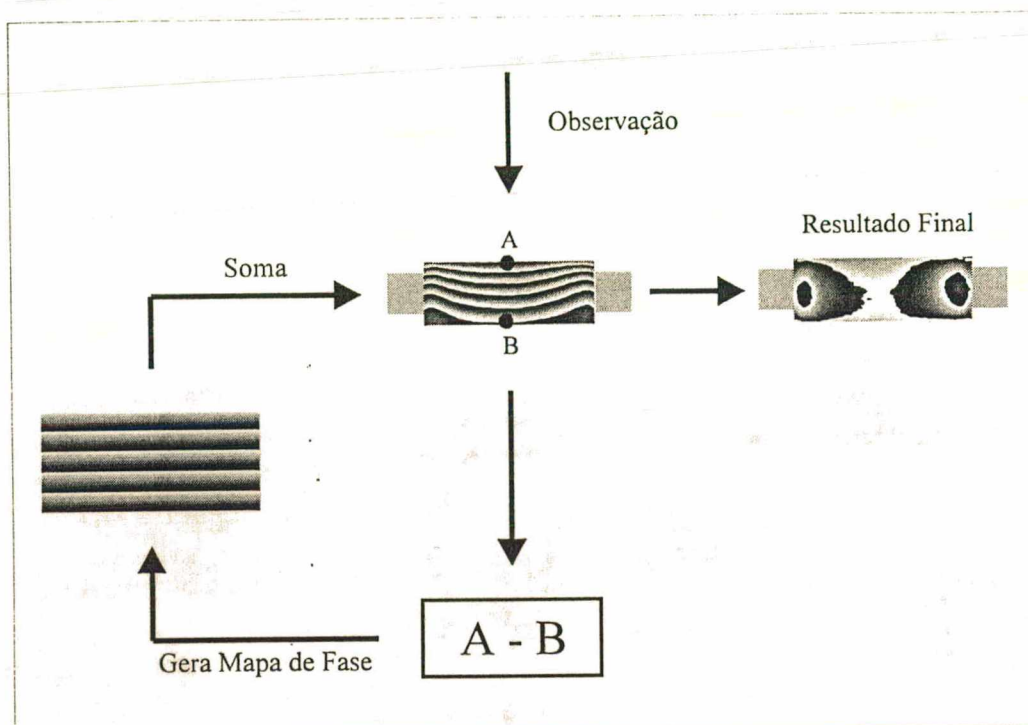


Figura 7.3 - Compensação eletrônica do deslocamento de corpo rígido

Este segundo método mostrou repetibilidade bem melhor do que a compensação manual, sendo utilizado ao longo dos ensaios de aprofundamento descritos a seguir.

### 7.2.2 - Testes de Aprofundamento

Nestes testes foram estabelecidas as magnitudes de rotação necessárias para a localização satisfatória das falhas. Os fatores influentes na deformação da peça (tipo de borracha, dimensões, ...) foram mantidos constantes e a única variante foi o tamanho dos descolamentos. Estabeleceu-se portanto a relação tamanho de defeito/rotação para cada uma das três peças. Variou-se a rotação através de polias e também pela variação da tensão elétrica sobre o motor, por meio de reostato.



Foram estabelecidas, também, as demais condições experimentais (sensibilidade, tempo de carregamento, tempo de observação, ...) adequadas para a operacionalização da técnica.

### 7.2.2.1 - Descolamento de 40 mm

Para esta peça já se haviam obtido resultados satisfatórios nos testes de viabilidade (cap. 6), aplicando rotações em torno de 7000 rpm. Assim, a partir deste nível a rotação foi diminuída até o menor valor no qual os resultados continuavam satisfatórios.

Obtiveram-se resultados com razoável indicação da falha até rotações ao nível de 4500 rpm, embora para este valor esta indicação não tenha sido claramente visível, além de haver pouca repetibilidade nos resultados. A figura 7.4 mostra o melhor resultado para esta rotação.


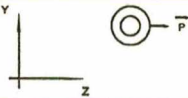
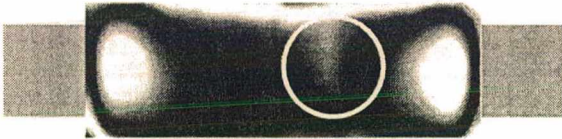

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente :	

Figura 7.4 - Rotação de 4500 rpm sobre falha de 40 mm

A menor rotação na qual os resultados mostraram-se satisfatórios e repetitivos ocorreu a 6000 rpm. A peça foi deixada nesta condição por 60 segundos e, 2 segundos após a parada, observaram-se os deslocamentos durante 6 minutos. Após variar os tempos de carregamento e observação, estas foram as condições suficientes para provocar o efeito desejado. Na figura 7.5 pode-se ver o resultado destes testes. Em quase 100% dos testes realizados sob estas condições conseguiu-se o efeito desejado.


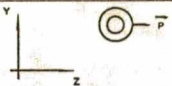
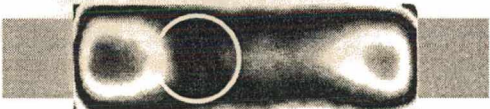

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 7.5 - Rotação de 6000 rpm sobre falha de 40 mm

7.2.2.2 - Descolamento de 20 mm

Já havendo a indicação de que, para esta peça, a rotação de 7000 rpm não havia levado a resultados satisfatórios, elevou-se a velocidade da peça até o valor que torna evidente o descolamento presente. Os melhores resultados foram obtidos com rotação a partir de 8000 rpm durante 3 minutos de carga e 6 minutos de observação. Sob esta rotação esta peça sofreu deformações bem maiores mas o efeito diferenciado sobre a falha foi menor do que para a peça anterior, tornando a falha menos evidente. A repetibilidade destes testes foi bem menor do que

para o defeito de 40 mm: em cerca de 40% dos testes sob estas condições conseguiu-se localizar os defeitos. A figura 7.6 ilustra um resultado, podendo-se ver que o efeito superficial foi menor do que na peça anterior.


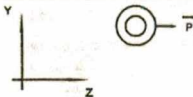
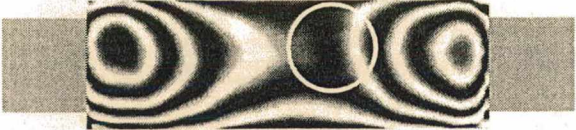

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 7.6 - Rotação de 8000 rpm sobre falha de 20 mm

7.2.2.3 - Descolamento de 10 mm

Nesta peça os ensaios foram iniciados com rotações também a partir de 7000 rpm, obtendo-se os melhores resultados com a rotação a partir de 8600 rpm. Utilizou-se os mesmos tempos de carregamento e observação utilizados para a peça anterior: 3 minutos de carregamento e 6 minutos de observação. Não se obtiveram resultados plenamente satisfatórios neste defeito. O efeito superficial foi pequeno e os melhores resultados ao longo dos ensaios corresponderam a cerca de 30% das tentativas. Na figura 7.7 pode-se ver um resultado do carregamento sob essas condições.




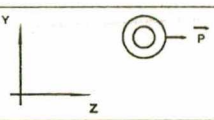
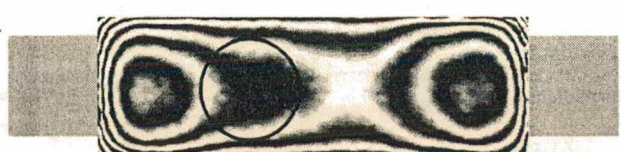

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 7.7 - Rotação de 8600 rpm sobre falha de 10 mm

A queda na repetibilidade dos resultados para estes os dois defeitos menores pode ser associada à influência de fatores aleatórios sob as condições de ensaio (variações de temperatura ambiente, erros de procedimento, ...). Estes fatores causam efeitos comparáveis àqueles causados por ação da força centrífuga. Ou seja, o resultado da ação do carregamento sobre estas falhas é da mesma ordem de grandeza das incertezas presentes nos ensaios.

As rotações para as peças com defeitos de 20 e 10 mm foram aumentadas até o limite de 9200 rpm, sem melhora nos resultados. Ao contrário, para rotações próximas deste valor as vibrações crescem sensivelmente, tornando impraticável operar o sistema acima deste limite.



Para as rotações mais altas e maiores tempos de carregamento e observação, pôde-se notar o efeito do calor gerado nos mancais que se propagava ao longo do tubo metálico, causando influência sobre a borracha. A figura 7.8 mostra o resultado da rotação de 9000 rpm durante 12 minutos sobre a peça com defeito de 20 mm, observando-se o retorno da borracha durante 16 minutos. Pode-se notar as não homogeneidades (efeito hélice) como efeito da dilatação térmica provocada pelo calor gerado nos mancais.


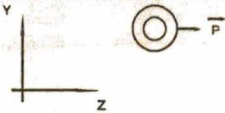
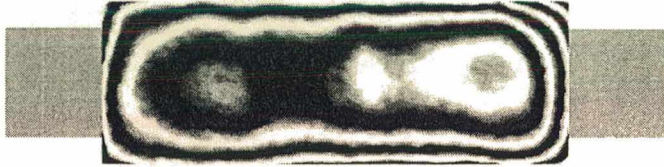

Carregamento	Sensibilidade
	
M. Franja	
Gradiente	

Figura 7.8 - Efeito do calor gerado durante a rotação

### 7.3 - PADRONIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TESTES

Foram padronizados três procedimentos de ensaio, que devem ser selecionados em função da resolução requerida, em termos do tamanho de defeito a ser detectado. Os valores especificados na tabela da figura 7.9 foram obtidos dos ensaios de aprofundamento descritos anteriormente e aplicam-se somente para estas peças ensaiadas. Foram especificados também o número de ensaios a serem repetidos, para cada tamanho de defeito, de modo a aumentar a confiabilidade da técnica.

Por confiabilidade, entende-se a probabilidade dos ensaios fornecerem resultados satisfatórios sob determinadas condições e para cada tamanho de defeito. Segundo a *American Society for Metals* [19], a confiabilidade de uma técnica de NDT se relaciona com a repetibilidade da técnica, ou seja com a quantidade de vezes, em relação ao número de testes, que a técnica localizará uma falha, em caso de sua ocorrência. A relação entre a confiabilidade e a repetibilidade é dada, de forma simplificada, por:

$$C = [1 - (1 - R)^n] \cdot 100 \quad (7.1)$$

onde

C = confiabilidade obtida

R = repetibilidade do ensaio para cada tamanho de defeito

n = número de ensaios realizados

Devido à baixa repetibilidade dos resultados nas peças com descolamentos de 20 e 10 mm, pode-se observar o elevado número de ensaios necessário para obter-se uma confiabilidade acima de 90%.

CONDIÇÕES NECESSÁRIAS	TAMANHO DE DEFEITO ADMISSÍVEL		
	10 mm	20 mm	40 mm
Rotação (rpm)	8600	8000	6000
Tempo de carga (minutos)	3	3	1
Intervalo entre fim da rotação e início da observação (segundos)	2	2	2
Período de observação (minutos)	6	6	6
Número de ensaios	7	5	1
Confiabilidade	≈90%	≈90%	≈100%

Figura 7.9 - Tabela com condições padronizadas de ensaio

Para todas as condições de ensaio utiliza-se configuração de iluminação simples. A figura 7.10 ilustra o posicionamento relativo dos componentes do sistema, resultando em um vetor de sensibilidade com módulo igual a 1,96 (faixa de 0 a 2), otimizado para deslocamentos horizontais e normais à superfície da peça.

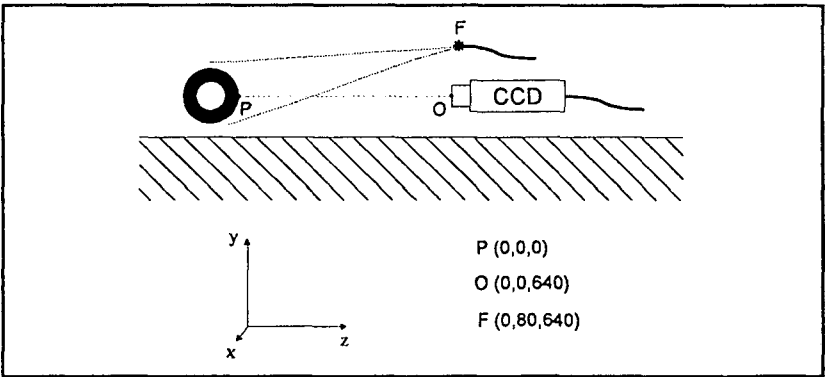


Figura 7.10 - Posicionamento dos elementos sobre bancada de testes

## 8. CONCLUSÕES

A Holografia Eletrônica apresenta-se como uma poderosa ferramenta para análise experimental e Ensaios-Não-Destrutivos (NDT) de materiais e componentes. As vantagens apresentadas pela técnica em termos de altíssima sensibilidade e a possibilidade de medição sem contato de todo o campo de deslocamentos presente na superfície de uma peça, permite sua aplicação em grande variedade de casos, grande parte deles certamente ainda inexplorados. Em alguns casos, é a única técnica viável de aplicação.

As limitações ainda apresentadas dificultam a sua maior utilização em ambientes industriais. A tendência crescente de introduzir esta técnica no meio industrial não só a aproximará de sua finalidade maior, como também irá acelerar o desenvolvimento de novos procedimentos e campos de ensaio e a solução destas limitações.

Procurou-se, no trabalho, ilustrar os conceitos e potencialidades da técnica estudando-se um problema real de grande interesse para uma indústria, cuja solução seria bastante improvável por outros métodos não-destrutivos. Aqui são descritas algumas recomendações técnicas para utilização da HE para NDT, além de comentários finais acerca do trabalho realizado.

## 8.1 - DIFICULDADES ENCONTRADAS

As dificuldades específicas, enfrentadas para cada alternativa experimental, encontram-se descritas no texto pertinente. De certo modo, estas dificuldades estão relacionadas a um fator principal: a altíssima sensibilidade da HE para a medição de deslocamentos aliada à alta deformabilidade da borracha.

A utilização corrente de uma técnica que apresenta resolução para medição de deslocamentos da ordem dos  $10^{-8} m$  exige algum tempo de experimentação e vivência prática para se ter noção razoável do que isto representa. O projeto de dispositivos de fixação e aplicação de esforços e o processo de aplicação dos carregamentos demandam atenção a todo fator de influência. Praticamente não são permitidas simplificações ou descon siderações, principalmente se o material analisado possui um baixo módulo de resistência e alta deformabilidade, como a borracha. A otimização dos dispositivos e procedimentos experimentais é um aprendizado contínuo e paralelo ao amadurecimento do pesquisador e está baseado, fundamentalmente, em uma forte experimentação. Com este aprendizado, ter-se-á uma melhor noção prática dos fatores de influência a considerar ou descartar.

Os principais fatores de influência enfrentados ao longo do trabalho estão relacionados abaixo, para os quais são dadas algumas recomendações de ordem geral, aplicáveis a outros trabalhos.

**a) Variações de temperatura ambiente**

Um ambiente com boa estabilidade de temperatura é desejável, para a redução do efeito aleatório de contração/dilatação térmica sobre o elemento em análise, principalmente se o material apresenta um alto coeficiente de dilatação térmica (alta instabilidade dimensional), como a borracha. Em ensaios quantitativos esta característica é, mais do que desejável, uma exigência para a redução dos erros aleatórios nas medições. Neste trabalho, as correntes de convecção existentes no laboratório, principalmente devido ao sistema de ar-condicionado, foram as principais perturbações desta ordem ocorrentes ao longo dos ensaios.

**b) Deslocamentos de corpo rígido**

Durante a aplicação do carregamento/observação com o sistema, é desejável que as franjas de interferência estejam relacionadas somente com a deformação da peça sob efeito da carga. Deslocamentos de corpo rígido alteram este padrão de franjas, diminuindo a sensibilidade para a visualização de defeitos (ensaios qualitativos) e introduzindo erros de medição (ensaios quantitativos). Para evitar-se este problema, são necessários dispositivos suficientemente rígidos para fixação do corpo, além de uma adequada aplicação do esforço. Na ocorrência destes deslocamentos deve-se, sempre que possível, explorar as vantagens que técnicas de compensação possam oferecer.

**c) Uniformidade na aplicação do esforço**

Além de provocar deslocamentos de corpo rígido, o modo pelo qual o carregamento é aplicado pode também provocar deformações localizadas e induzir a detecção de falsos defeitos. Se o material apresenta uma alta deformabilidade, este deve ser um fator relevante no projeto de dispositivos e nos cuidados na aplicação do esforço.

Nos ensaios realizados, estes cuidados foram maiores na aplicação dos esforços mecânicos com contato (cisalhamento) e no carregamento térmico. Por causa da borracha ser muito deformável, esta preocupação se estendeu também ao manuseio dos corpos de prova durante os experimentos.

#### **d) Vibrações**

Apesar da HE ter uma sensibilidade às vibrações menor do que a holografia convencional, ainda é necessário um bom isolamento da bancada de ensaios. Este requisito é o principal entrave técnico da aproximação da HE com o meio industrial.

Nos experimentos realizados, utilizou-se uma bancada apoiada em suspensão pneumática e não se enfrentou maiores problemas. Apenas com o carregamento com a rotação este problema causou maiores dificuldades, visto que a vibração era gerada **sobre** a bancada.

#### **e) Variações de temperatura na peça causadas pela aplicação do carregamento**

A parcela de energia mecânica dissipada na forma de calor, em alguns carregamentos, causa influência significativa nos resultados, devendo ser um parâmetro de relevância na escolha do carregamento e projeto de dispositivos mecânicos. Pôde-se sentir este efeito nos experimentos realizados com o cisalhamento e rotação, em que o calor gerado pelo atrito de partes em movimento influencia os resultados.

Quando o carregamento envolve variação de pressão pneumática sobre a peça, deve-se ter cuidado com a variação de temperatura causada pelos efeitos termodinâmicos conseqüentes da compressão/expansão do ar. Dependendo da pressão utilizada, há alterações de temperatura que podem causar deformações térmicas significativas no elemento em análise. Enfrentou-se este problema ao utilizar-se o vácuo como carregamento.

#### **f) Simetria na iluminação da peça**

Além dos cuidados com a escolha da configuração mais adequada (iluminação simples ou dupla) determinando uma boa sensibilidade à medição dos deslocamentos, aconselha-se que a iluminação e observação apresentem simetria em relação ao corpo de prova. Isto requer montagens que façam o vetor sensibilidade ser máximo no centro do corpo de prova, com a observação sendo feita frontalmente à peça.

## 8.2 - VALIDADE DO TRABALHO

Ao longo da pesquisa bibliográfica realizada, observou-se que os trabalhos envolvendo HE como ferramenta de NDT podem ser classificados em duas linhas básicas, havendo em ambas, a crescente integração destes trabalhos com o meio produtivo:

**1) Aplicação:** de posse da ferramenta de inspeção, procura-se aplicar em casos conhecidos, utilizando-se técnicas de carregamento e visualização também clássicas, sem maiores aprofundamentos no desenvolvimento da HE nem do princípio de carregamento.

**2) Desenvolvimento:** os trabalhos desta linha têm sempre um caráter de inovação, seja no estudo de um caso inédito, no desenvolvimento de novos princípios de carregamento ou em novas formas de processamento e visualização dos resultados.

Além de ilustrar os conceitos da técnica, a validade do trabalho realizado justifica-se por ser uma tentativa nesta segunda linha e direcionada para uma aplicação real, de interesse de uma indústria. São considerados os resultados mais significativos:

- Estudo de técnicas NDT e de casos bem sucedidos da aplicação da HE para este fim;
- Proposta de metodologia sistematizada de desenvolvimento de NDT com HE;
- Teste de vários princípios de carregamento em HE, um deles bastante original e com bons resultados;
- Recomendações acerca de dificuldades nos experimentos, úteis para futuros usuários;
- Teste, utilização e padronização de novas técnicas de processamento de imagens;
- Divulgação da HE como ferramenta para análise experimental.



Em relação à técnica desenvolvida, alguns comentários sobre sua aplicabilidade se fazem necessários:

- Os resultados obtidos para os defeitos menores não apresentaram uma repetibilidade satisfatória indicando que, para as condições experimentais utilizadas, o menor tamanho de defeito possível de localização com boa confiabilidade, está em torno de 40  $\mu\text{m}$ . Este resultado se aplica somente a esta peça, com suas características específicas
- As condições apresentadas pelas peças ensaiadas são das mais difíceis para a localização dos descolamentos. A dureza da borracha, a inexistência de cavidade de ar na interface descolada, além da relação espessura de revestimento/diâmetro da peça são fatores bastante desfavoráveis. A aplicação da rotação sobre cilindros de diâmetros maiores e com borracha menos rígidas certamente favorecerá a ação da força centrífuga sobre a peça, o que fará diminuir o limite do menor defeito possível de localização, aumentando a repetibilidade dos resultados;
- No entanto, a aplicação da técnica em cilindros de grande porte trará alguns inconvenientes: se isto favorece a ação da força centrífuga, dificulta a iluminação e visualização de toda a peça, além de aumentar a possibilidade de vibrações.
- A utilização da técnica em um ambiente produtivo vai requerer diversos cuidados contra as perturbações citadas em 8.1, especialmente as vibrações. Nestas condições, a utilização de espelhos como recurso para otimizar a sensibilidade das montagens ópticas deve ser evitada, pois isto torna o sistema bem mais sensível a estas perturbações;

- Apesar da técnica de carregamento ser bastante específica para o caso em estudo, os métodos de processamento de imagens podem ser aplicados para casos genéricos, aumentando os recursos da HE para NDT e facilitando a interpretação dos resultados, que ficam mais inteligíveis;
- A localização dos descolamentos metal-borracha por outros métodos NDT, vistos no capítulo 2, seria bastante difícil ou impraticável. Tem-se tentado a utilização do ultrassom para a localização de descolamentos nos cilindros revestidos, mas este NDT apresenta algumas limitações além daquelas citadas no item 2.3.4.1:

. O ultrassom fornece informações apenas localizadas, requerendo uma inspeção demorada sobre toda a superfície da peça;

. A borracha apresenta-se como um material de alta impedância acústica, absorvendo muito as ondas ultrassônicas. Isto requer atuadores específicos para este caso, aumentando mais ainda os custos na operação;

. A borracha e o metal possuem características acústicas muito distintas, de modo que a reflexão da onda ultrassônica, ao passar da borracha para o metal, será grande, principalmente se comparada à parcela devida a um eventual descolamento. Isto irá dificultar muito a localização das falhas. É imprescindível a existência de cavidade de ar na interface descolada.

### 8.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A HE, pelos recursos apresentados, possui um grande potencial de aplicabilidade. A descoberta e exploração de novos campos de aplicação da técnica deve ser buscada com bastante ênfase e deve ocorrer paralelamente ao seu desenvolvimento e superação de limitações ainda existentes. Neste sentido, como contribuição para a busca de novos trabalhos, são sugeridas as seguintes áreas de aplicação:

- a) Desenvolvimento de sistemas automatizados, de uso geral, para a aplicação e monitoração de carregamentos para fins de NDT com HE;
- b) Desenvolvimento de métodos de processamento de imagens "inteligentes", para a identificação, classificação e análise de falhas, de forma automática;
- c) Desenvolvimento de um sistema portátil de HE, para teste em campo;
- d) Análise de deformações causadas por falhas de montagem;
- e) Análise de desuniformidade de estrutura em materiais conjugados;
- f) Bolhas, inclusões e desuniformidade de parede em produtos plásticos;
- g) Desuniformidades e bolhas em pinturas e outros revestimentos para proteção de superfícies;
- h) Investigação de propriedades físicas em novos materiais;
- i) Localização de trincas em estruturas.



- [9] FARLEY, J. M. **Total Quality in NDT Operations - The role of National NDT Societies**  
 Proceedings - The 13th World Conference on Nondestructive Testing - NDT, 1992  
 Vol. 1, pg. 125
- [10] PAPADAKIS, E. **Future Growth of Nondestructive Evaluation**  
 Material Evaluation, Setembro-1983, n° 41, pg,1130
- [11] SCHLICHT, A.  
 ZHIRABOK, A. **The Integrated Expert Systems for NDT in Quality Control Systems**  
 Proceedings - The 13th World Conference on Nondestructive Testing - NDT, 1992  
 Vol. 1, pg. 201
- [12] KLJUEV, V.V  
 ORLOV, N. A. **Implemetation of Artificial Intelligence Methods in NDT Expert System approach**  
 Proceedings - The 13th World Conference on Nondestructive Testing - NDT, 1992  
 Vol. 1, pg. 505
- [13] DIJK, G. M. V.  
 BOOGAARD, J. **NDT Reliability - A way to go**  
 Proceedings - The 13th World Conference on Nondestructive Testing - NDT, 1992  
 Vol. 1, pg. 31
- [14] HWA, S. J. **NDT & Quality Assurance**  
 Proceedings - The 13th World Conference on Nondestructive Testing - NDT, 1992  
 Vol. 1, pg. 206
- [15] American Society for  
 Nondestructive Testing **NONDESTRUTIVE TESTING HANDBOOK**  
 Vols. 1 - 6, 1986
- [16] LEITE, P.G.P. **Ensaios-Não-Destrutivos**  
 Curso ABM - Associação Brasileira de Metais, 1977

- [17] MARQUESE, C.M.                    **Ensaio-Não-Destrutivo em recipientes sob Pressão**  
Coletânea UFSC, 1985  
Núcleo de informação setorial Metal-Mecânica
  
- [18] HAGEMAIER, D. J.                **Applications for Specialized Nondestructive Testing Methods**  
Metal Progress, Agosto-1971, pg. 67
  
- [19] ASM - American Society        **Metals Handbook - Nondestructive Inspection and Quality Control**  
for Metals  
Vol. 11, 1976
  
- [20] MATVEEV, A.N.                   **Optics**  
Mir Publishers Moscow, 1988
  
- [21] VEST, C.M.                        **Holographic Interferometry**  
Jonh Wiley & Sons, 1979
  
- [22] JONES, R.                         **Holographic and Speckle Interferometry**  
WYKES, C.                             Cambridge University Press, 1989
  
- [23] ROBINSON, D.W.                **Automatic Fringe analisys with a Computer Image Processing System**  
Applied Optics, Julho-1983  
Vol. 22, nº 14, pg. 2169
  
- [24] NAKADATE, S.                    **Fringe Scanning speckle-pattern Interferometry**  
SAITO, H.                             Applied Optics, Julho-1985  
Vol. 24, nº 14, pg. 2172
  
- [25] CREATH, K.                       **Phase Measurements Techniques for NDT**  
Proceedings - Hologram Interferometry and Speckle Metrology, Novembro-1990, pg 473-479
  
- [26] VROOMAN, H.A.                **Image Processing Algorithms for the Analisis of Phase-Shifted speckle Interferometry Patterns**  
MAAS, A.A.M.                       Applied Optics, Maio-1991  
Vol. 30, pg. 1636

- [27] ALBERTAZZI, A. **Estação Holográfica: Uma nova Ferramenta para a Mecânica Experimental**  
Anais, 7º SIBRAT, Outubro-1992
- [28] MYLER, H.R.  
WEEKS, A.R. **Computers Imaging Recipes in C**  
Prentice Hall, 1993
- [29] ROSENFELD, A.  
KAK, A.C. **Digital Picture Processing**  
Academic Press, 1982, Vols. 1 e 2
- [30] KAKISAKI, S.  
TNANIDA, J. **Gray-Image Processing Using Optical Array Logic**  
Applied Optics, Março-1992  
Vol. 31, nº 8, pg. 1093
- [31] CANNON, M.  
LEHAR, A.  
PRESTON, F. **Background Pattern removal by Power Spectral Filtering**  
Applied Optics, Março-1983  
Vol. 22, nº 6, pg. 777
- [32] KREIS, T.  
JÜPTNER, W. **Digital Processing of Holographic Interference Patterns using Fourier-Transform Methods**  
Measurement, Janeiro/Março-1988  
Vol. 6, nº 1, pg.37
- [33] COREL CORPORATION **COREL 4.0 - Editor Gráfico**  
1988-1993
- [34] NOKES, J.P.  
CLOUD, G.L. **The Application of three Interferometric techniques to the NDE of Composite Materials**  
Proceedings - SPIE, 1993  
Vol. 2004, nº 6, pg. 18-26
- [35] LOKBERG, O.J.  
MALMO, J.T. **Detection of Defects in Composite Materials by TV Holography**  
NDT International, Agosto-1988  
Vol. 21, nº 4, pg. 223
- [36] HUNG, Y.Y. **Shearography: a practical Nondestructive Testing Method**  
Proceedings, NDT - 1992, Vol. 1, pg. 95

- [37] BUTTERS, J.N.                      **Application of ESPI to NDT**  
Optics and Laser Technology, Junho-1977, pg. 117
- [38] VEST, C.M.                        **Status and Future of Holographic Evaluation**  
Proceedings - SPIE, 1982  
Vol. 349, pg. 186
- [39] TYRER, J.R.                        **Critical Review of Recent Developments in**  
**Electronic Speckle Pattern Interferometry**  
Proceedings - SPIE, 1986  
Vol. 604, pg. 95
- [40] GRANT, I.                            **Use of Feedback Fringe Control in Holographic**  
WANG, J.                                **Nondestructive Testing of Debonding**  
TAN, Y.                                  Applied Optics, Maio-1989  
Vol. 28, nº 10, pg.1744
- [41] DELARMINAT, P.M.                **A fringe compensation technique for stress analysis by**  
WEI, R.P.                                **reflection Holographic Interferometry**  
Experimental Mechanics, Outubro-1976, pg.241
- [42] WATERS, J.P.                        **Object Motion Compensation by speckle reference**  
**beam Holography**  
Applied Optics, Março-1972  
Vol. 11, nº 3, pg.630
- [43] WATERS, J.P.                        **Object Motion Compensation in CW Holography**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 229
- [44] VEST, C.M.                        **Crack Detection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 289
- [45] SMET, M.A.                        **Holographic NDT for composite material**  
**used in aerospace**  
Proceedings - SPIE, 1985, Vol. 599, pg. 46



- [46] HERBERT, P.P.  
RICHARDSON, M.O.W. **The use of ESPI in the crack propagation analysis of Epoxy Resins**  
Optics and Laser in Engineering, Junho-1984, pg. 249
- [47] BOHN, J.R.  
GOTTENBERG, W.G. **Holography for Materials Response Measurements**  
Journal of Nondestructive Testing, Junho-1971  
n° 6, pg.247
- [48] STEKEL, A.  
NOTEA, A. **Quantitative Holographic Interferometry of internal defects in testing bars**  
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1991, pg. 597
- [49] RASTOGI, P.K. **Comparative Holographic Interferometry: a Nondestructive Inspection System for Detection of flaws**  
Experimental Mechanics, Dezembro-1985, pg.325
- [50] WAGNER, J.W. **Detecting Nonuniformity in Small welds and solder seams using optical correlation and eletronic processing**  
Applied Optics, Outubro-1981  
Vol. 20, n° 20, pg.3605
- [51] CIELO, P. **Optical Techniques for Industrial Inspection**  
Academic Press, 1988, pg. 321
- [52] ENNOS, A.E. **Cylindrical Bore Inspection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 333
- [53] ERF, R.K. **Turbine Blade Inpection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 343
- [54] BROWN, G.M. **Pneumatic Tire Inspection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 355

- [55] CIELO, P. **Optical Techniques for Industrial Inspection**  
Academic Press, 1988, pg. 324
- [56] SHANG, H.M.  
TOH, S.L. **Locating and Sizing Disbonds in Glassfibre-Reinforced Plastic Plates using Shearography**  
Journal of Engineering Materials and Technology, Jan-1991  
Vol. 113, n° 1, pg. 99
- [57] SHANG, H.M  
TOH, S.L **Interpretation of Holographic Fringes for estimating the size and depth of debonds in laminated plates**  
Proceedings - SPIE, 1991, Vol. 1554B, pg. 680
- [58] KE, J. **Advancement of Optical Nondestructive Testing in China**  
Proceedings - SPIE, 1985, Vol.599, pg. 178
- [59] NEWMAN, J.N. **Holographic Inspection of Composites**  
Proceedings - SPIE, 1986, Vol. 604, pg.57
- [60] BROWN, G.M. **From Tire testing to Holometry and Beyond**  
Proceedings - SPIE, 1993, Vol. 2004, pg. 2-15
- [61] KERSCH, L.A. **Laminated Structure Inspection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 303
- [62] VIKHAGEN, E. **TV Holography: Spatial Resolution and signal Resolution in deformation analysis**  
Applied Optics, Fevereiro-1991  
Vol. 30, n° 4, pg. 420
- [63] VIKHAGEN, E.  
LOKBERG, O.J. **Detection of defects in composite materials by Television Holography and Image Processing**  
Materials Evaluation, fevereiro-1990  
Vol. 48, pg. 244
- [64] VIKHAGEN, E. **Nondestructive Testing by use of TV Holography and Deformation Phase Gradient Calculation**  
Applied Optics, Janeiro-1990  
Vol. 29, pg. 137

- [65] CHEN, T.Y.  
WANG, W.R. **Use of Thermal Stressing Technique in Holographic Detection of Coating Flaws**  
Experimental Techniques, Fevereiro-1993, pg. 30
- [66] ANASTASI, R.F.  
SERABIAN, S.M. **Nondestructive Detection of Simulated Delaminations in Composite laminated by Laser Speckle Shearography**  
Experimental Techniques, Junho-1987, pg.28
- [67] HARRIS, W.J.  
CLAUSS, F.J. **Inspecting Bonded Structures by Laser Holography**  
Metal Progress, Agosto-1971, pg. 63
- [68] GRYZAGORIDIS, J. **Holographic Nondestructive Testing of Composites**  
Optics & Laser Technology, 1989, Vol. 21, nº 2, pg. 113
- [69] KERSCH, L.A. **Laminated Structure Inspection**  
Holographic Nondestructive Testing  
Academic Press, pg. 305
- [70] ZHU, J. **Optical Nondestructive Examination for Honeycomb Structure**  
Proceedings - NDT, 1992, Vol. 1, pg. 399
- [71] CHU, W.P.  
ROBINSON, D.M. **Holographic Nondestructive Testing with Impact excitation**  
Applied Optics, Julho-1972  
Vol. 11, nº 7, pg. 1644
- [72] ALFREY, T.  
GURNEE, E.F. **Polímeros Orgânicos**  
Editora Edgar Blücher, 1971
- [73] DUTRA, J.C.N  
MANO, E.B. **A formulação de composições da Borracha para aplicações especiais**  
Publicação Instituto de Macromoléculas (IMA) - UFRJ, 1987
- [74] BILLMEYER, F.W Jr. **Textbook of Polymer Science**  
Jonh Wiley and Sons, 1962
- [75] ROSEN, S.L. **Fundamental Principles of Polymer materials**  
Jonh Wiley and Sons, 1982

- [76] BLOW, C.M.  
HEPBURN, C. **Rubber Technology and Manufacture**  
2a. Edição, Butterworths, London, 1981, pg. 463-470
- [77] American Society for Testing of Materials **Annual Book of ASTM Standards**, 1975, vol. 37  
D412-68, Tension Testing of Vulcanized Rubber, pg. 72-82
- [78] Roll Covering Technical Commite **Roll Covering Handbook**, 1980  
The Rubbers Manufacturers Association, Inc.  
The Rubber Association of Canada
- [79] MUHR, A.H.  
THOMAS, A.G. **Allowing for Non-Linear Stress-Strain Relationships of Rubber in Force-Deformation Calculations**  
**Part II - relationship of hardness to modulus**  
Natural Rubber Technology, 1989  
Vol. 20, n° 2, pg. 27
- [80] Stowe-Woodward  
Elastômeros LTDA. **Propriedades e Desempenho dos Revestimentos**  
Divulgação do fabricante, 1987
- [81] POND, T.J. **Some factors affecting the Peel strength of Natural Rubber to glass fabric bonds**  
Rubber Developments, 1990  
Vol. 43, n° 3/4, pg.21
- [82] The Malaysian Rubber Producers Research Association **Why do rough surfaces stick better?**  
Rubber Developments, 1980  
Vol. 33, n° 4, pg. 109
- [83] MOODY, D.R. **Print Free Printing Rools**  
Tire Equipment Inc., Technical Information
- [84] The Malaysian Rubber Producers Research Association **Designing Engineering components in Natural Rubber**  
Rubber Developments, 1983  
Vol. 36, n° 3, pg. 76

- [89] American Society for Testing of Materials **Annual Book of ASTM Standards**, 1975, vol. 37 D2240-75, Tests for indentation Hardness of Rubber and Plastics by means of a durometer, pg. 507-510
- [90] PALAZOTTO, A.  
MADDUX, G.E. **The use of Stereo x-Ray and Depty Techniques for evaluating instability of composite cylindrical panel with delaminations**  
Experimental Mechanics, Junho-1989, pg. 144
- [91] BONAVERO, G. **Fabrication of the artificial reference defects for Nondestructive Testings**  
Proceedings - NDT, 1992, Vol. 1, pg. 115
- [92] HEIDA, J.H.  
BEUKER, G.J. **Manufacturing and Inspection of Artificial delamination in composite materials**  
Proceedings - NDT, 1992, Vol. 1, pg. 882
- [93] SHANG, H.M.  
CHAU, F.S. **Interpretation of Holographic fringes for estimating the size and depth of debonds in laminated plates**  
Proceedings, SPIE, 1991, Vol. 1554-B, pg. 680
- [94] COUTINHO, G.S. **Técnicas Híbridas para análise de tensões combinando Elementos Finitos e Holografia Eletrônica**  
Dissertação de Mestrado, UFSC-1993